



# Inversions du champ magnétique solaire: observations

Jean-Marie Malherbe

## ► To cite this version:

| Jean-Marie Malherbe. Inversions du champ magnétique solaire: observations. 2012. hal-00787809

**HAL Id: hal-00787809**

**<https://hal.science/hal-00787809>**

Submitted on 13 Feb 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Inversions du champ magnétique solaire: observations

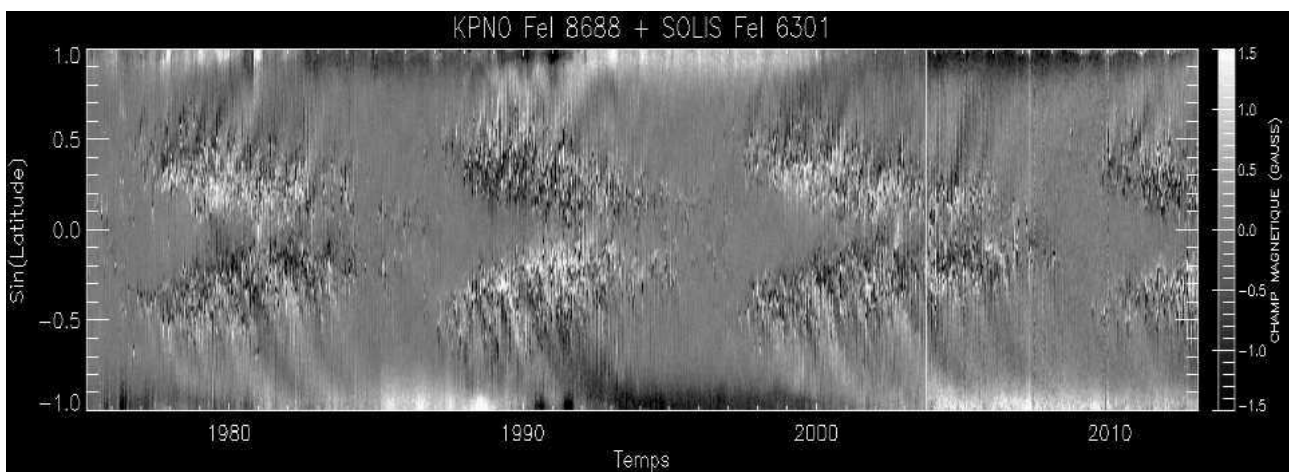
(conférence débat à l'Académie des Sciences, le 19 Juin 2012)

**Jean-Marie Malherbe**

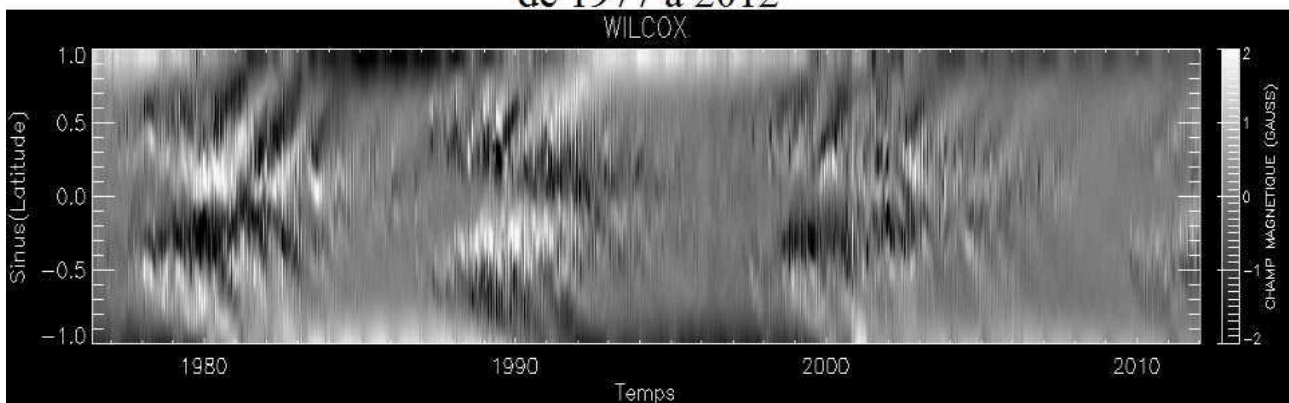
Observatoire de Paris

10 Février 2013

|   |    |
|---|----|
| I – Introduction: l'étoile Soleil   | 2  |
| II – Variabilité et cyclicité multi-longueur d'onde, indicateurs d'activité | 3  |
| III – Inversions magnétiques  | 9  |
| IV – Des anomalies dans la cyclicité  | 18 |



WILCOX et KPNO (USA), champ magnétique en fonction de la latitude de 1977 à 2012



35 ans d'observations des inversions magnétiques solaires...

## I – Introduction: l'étoile Soleil

Le Soleil est une étoile ordinaire parmi les 200 milliards que compte notre Galaxie. Proche de nous, il présente un diamètre apparent sur le ciel d'un demi-degré ce qui permet de l'étudier en détails. Comme toutes les étoiles, le Soleil est une sphère de gaz chauds qui rayonne. Son diamètre est de 1400000 km et sa masse de  $2 \cdot 10^{30}$  kg. Il est composé de 90% d'hydrogène et de 10% d'hélium. Les autres éléments ne représentent qu'une infime proportion de sa masse.

C'est au centre du Soleil (figure 1 gauche) que des réactions thermonucléaires de fusion transmutent l'Hydrogène en Hélium en produisant l'énergie et le rayonnement. Ces réactions sont confinées dans un milieu où la densité est extrême et la température atteint  $15 \cdot 10^6$  K. L'énergie produite traverse lentement le Soleil via la zone radiative puis convective pour atteindre les couches superficielles et est ensuite émise sous forme de lumière par la photosphère, à une température de l'ordre de 5800 K. L'intérieur solaire est inaccessible à l'observation directe, mais les récentes techniques d'héliosismologie (étude des modes de vibration de la surface visible, figure 1 droite) couplées à des modèles théoriques permettent de sonder la structure interne.

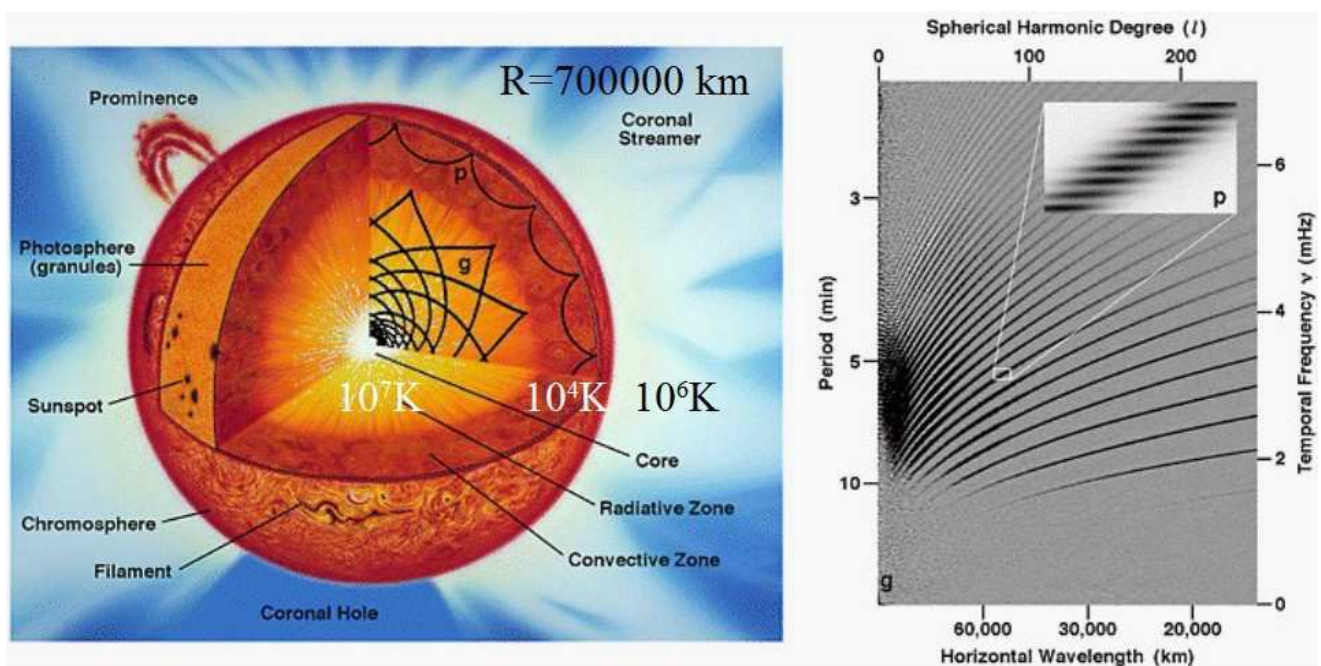


Figure 1: structure interne du soleil

Avec un instrument d'observation, on découvre les taches, régions qui présentent un champ magnétique élevé (1000 G). Le magnétisme est responsable de la plupart des phénomènes visibles dans l'atmosphère solaire (éruptions, protubérances, ejections de masse). On pense qu'il est généré par des courants électriques dans les couches situées sous la surface en liaison avec la rotation différentielle de l'étoile (effet dynamo).

Au dessus de la photosphère (couche visible épaisse de 300 km seulement) la température remonte pour atteindre environ 8000 K dans la chromosphère, épaisse de 2000 km, qui n'est visible qu'avec une instrumentation spécialisée comme le spectrohéliographe. On y observe des zones très brillantes (facules) mais aussi des filaments (sombres) de matière froide piégés dans des tubes de flux magnétique. Au-dessus de la chromosphère, pour des raisons encore mal expliquées, la température remonte à plus de  $10^6$  K dans la couronne très ténue et visible en Ultra Violet dans des raies d'éléments hautement ionisés comme le fer, en ondes radio ou au coronographe.

Les diverses manifestations de l'activité solaire sont modulées par un cycle de 11 ans, avec une succession de minima et de maxima qui comprend une inversion du champ magnétique solaire, donnant un cycle magnétique de 22 ans.



## II – Variabilité et cyclicité multi-longueur d'onde, indicateurs d'activité

Le soleil est étudié dans tous les domaines de longueur d'onde: au sol en optique et en radio; dans l'espace depuis des satellites, en Ultra Violet, rayons X et Gamma qui sont absorbés par l'atmosphère terrestre. L'Observatoire de Meudon détient une collection exceptionnelle de clichés de la photosphère et de la chromosphère étendue sur 10 cycles d'activité de 11 ans dans les raies  $H\alpha$  et  $CaII K$  (coeur de raie K3 et aile violette K1v, figure 2a).

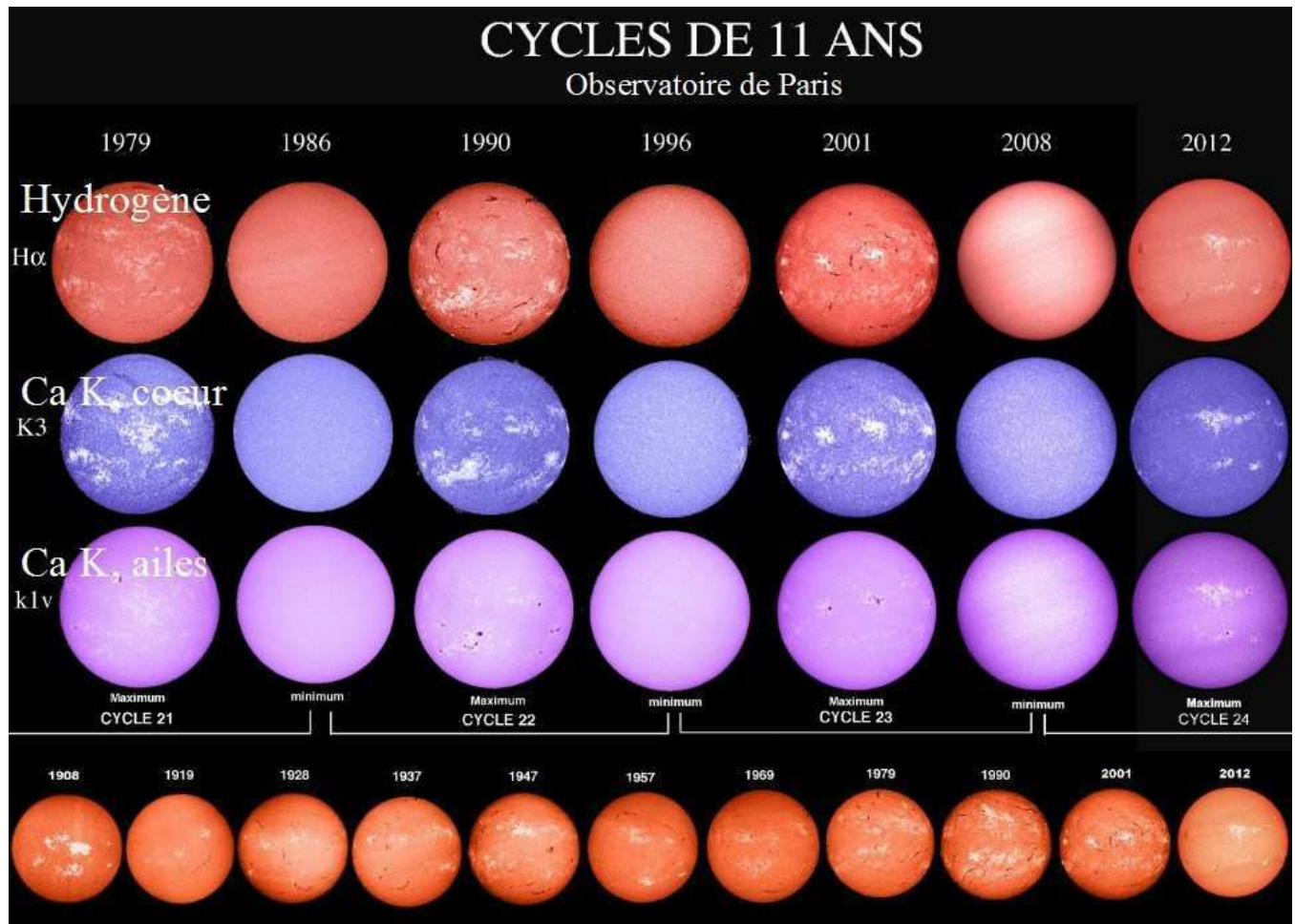


Figure 2a: spectrohéliogrammes montrant la modulation de l'activité par un cycle de 11 ans (alternance maxima/minima; la frise du bas montre en  $H\alpha$  les maxima depuis un siècle)

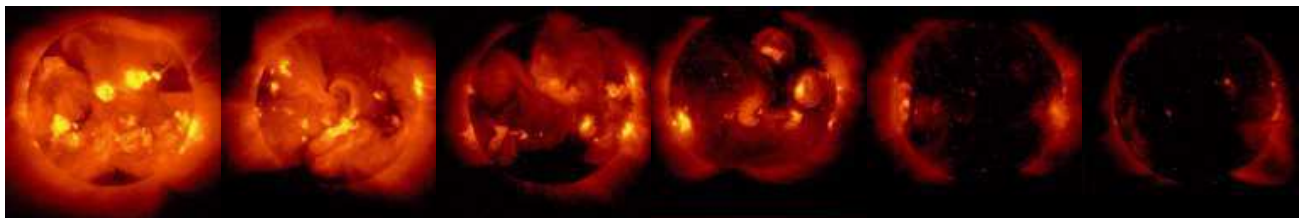


Figure 2b: du maximum solaire de 1990 au minimum de 1996 en rayons X (YOHKOH/JAXA)

Les taches ou groupes de taches (nombre de Wolf) sont comptées depuis 1750 avec précision par l'Observatoire Royal de Belgique (ROB). Le cycle de 11 ans a été découvert par Schwabe (figure 3), mais on peut constater que l'amplitude (ainsi que la durée) des cycles n'est pas régulière, avec des séries de cycles forts et faibles. Un lissage laisse apparaître des minima de faible amplitude (cycle de Gleissberg), avec une périodicité centennale mal établie (1820, 1910), montrant que nous nous dirigeons vers une série de cycles modérés avec des minima prononcés vers 2020.

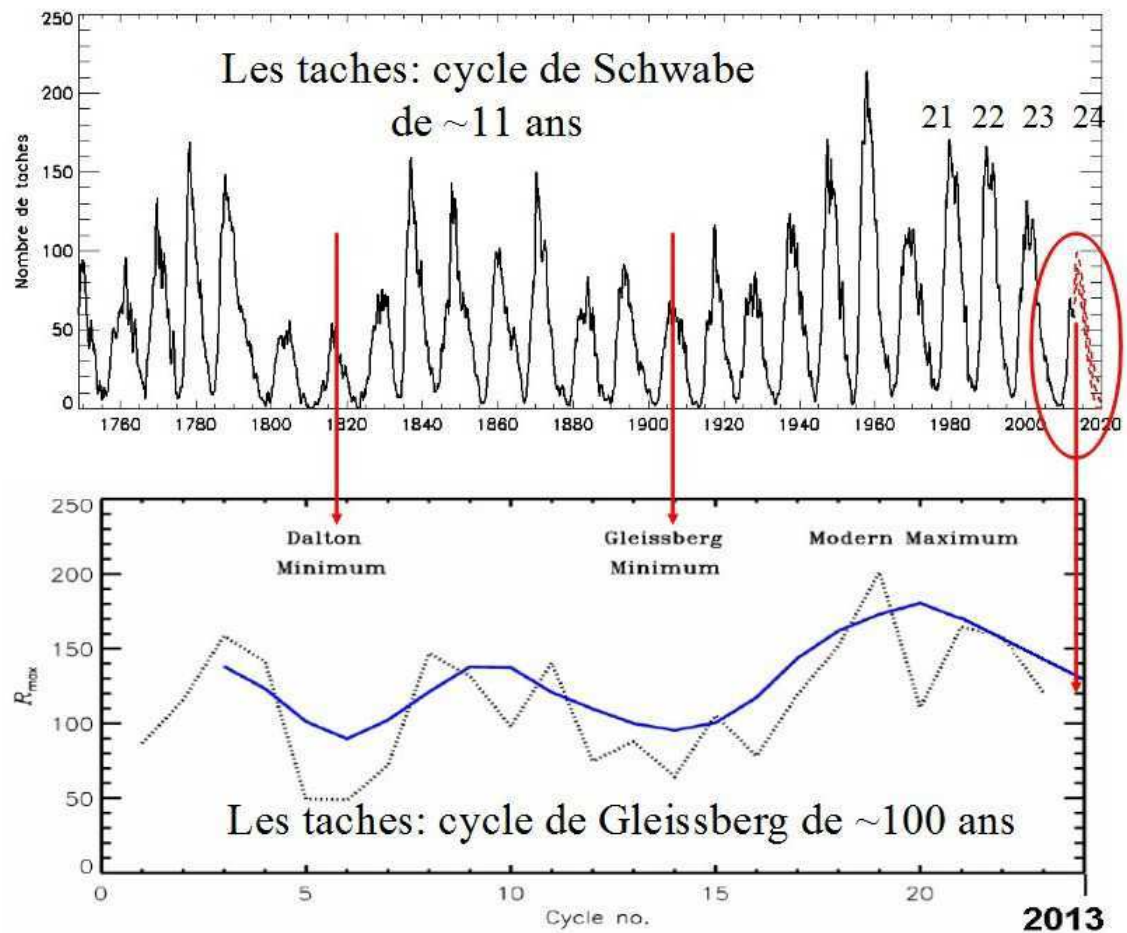


Figure 3: cycles de Schwabe (11 ans) et de Gleissberg (100 ans)

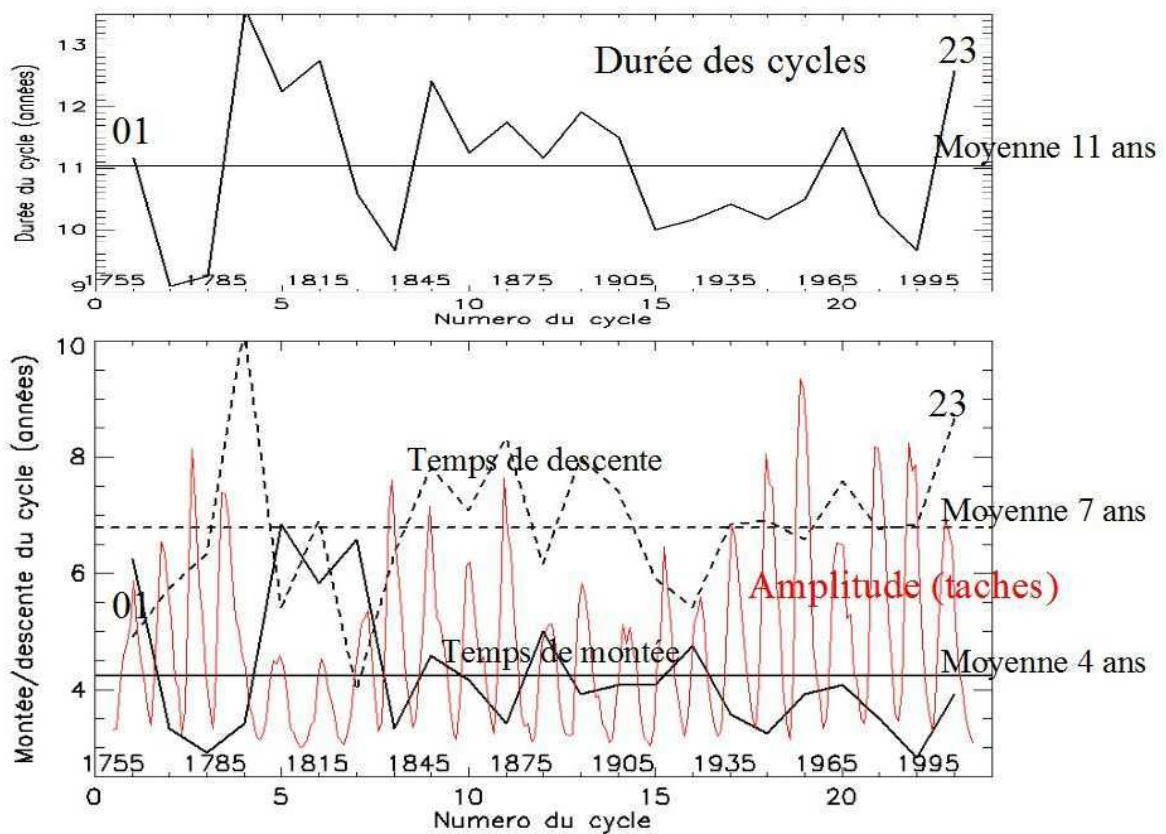


Figure 4: durée des cycles solaires (abscisse = numéro du cycle de 1 à 23)

La durée des cycles est présentée figure 4 avec en rouge l'amplitude du cycle des taches (nombre de Wolf de Bruxelles). Si la durée moyenne des cycles est de 11 ans, il existe une importante dispersion autour de cette moyenne puisque la fourchette s'établit entre 9 et 13 années. La montée des cycles est plus rapide que leur descente. En moyenne, le temps de montée est de 4 ans (dans une fourchette de 3 à 6 ans) tandis que leur descente dure 7 ans (dans une fourchette de 4 à 10 ans). Le cycle 23 dont nous sortons a eu un temps de descente long (9 ans); il faut remonter 200 ans en arrière pour trouver un temps de descente aussi long (cycle 4).

De nombreux **indices**, en plus des taches, ont été étudiés pour quantifier l'activité solaire, dans tous les domaines de longueur d'onde (voir <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/spaceweather.html>). La raie CaII à 393.7 nm constitue un bon indicateur. La figure 5 présente l'indice K (intégration sur le profil de la raie) ainsi que l'indice K3 correspondant au coeur de raie seulement, intégrés sur le disque. La raie K est particulièrement sensible aux facules ou régions brillantes magnétisées constituant les régions actives, autour des taches. Ces deux indices sont étroitement corrélés avec le nombre de Wolf des taches. Le flux radioélectrique à la longueur d'onde de 10.7 cm (figure 5), intégré sur le disque par une antenne et issu des régions actives, est également en excellente corrélation avec le nombre des taches de Bruxelles. Il varie d'un facteur 3 au cours du cycle.

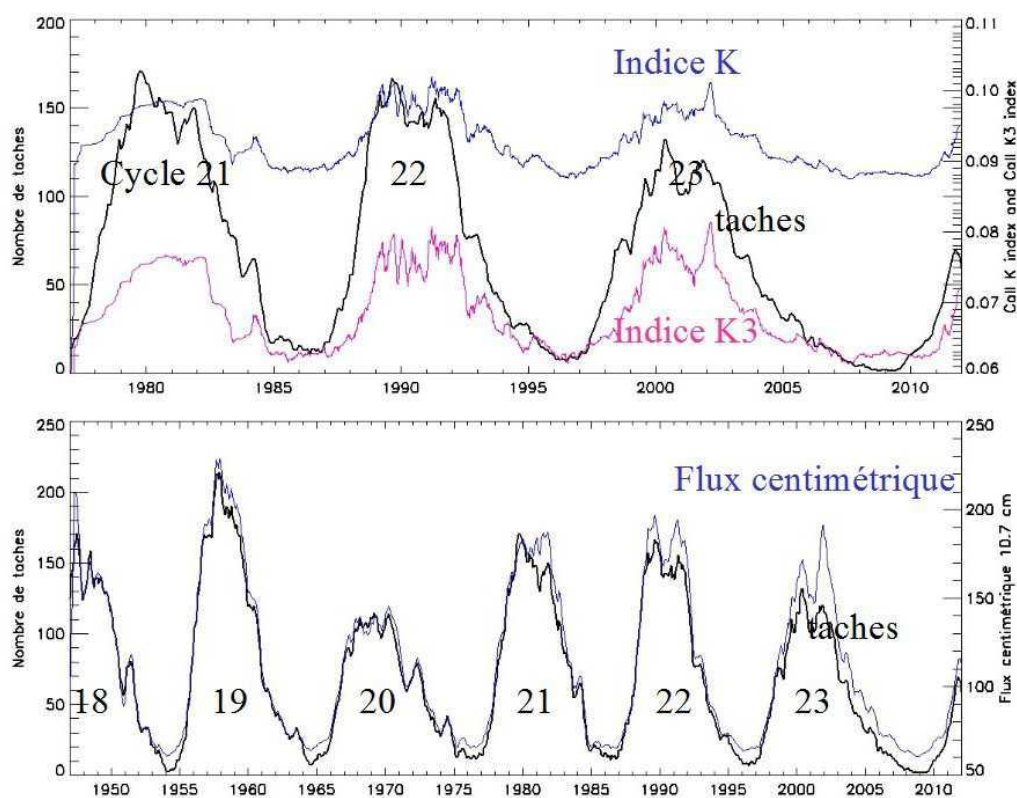


Figure 5: indices d'activité solaire CaII K et flux centimétrique à 10.7 cm

La figure 6 présente le flux de rayons cosmiques enregistré à la station de Kerguelen (IPEV) depuis 1965 et laisse découvrir une anti corrélation avec le cycle des taches (nombre de Wolf). On sait que les rayons cosmiques sont des particules chargées, donc soumises à l'influence des champs magnétiques via la force de Laplace ( $q \mathbf{V} \wedge \mathbf{B}$ ). Lors des minima d'activité solaire, les champs magnétiques gelés dans le vent solaire étant moins intenses, les rayons cosmiques sont moins déviés donc plus pénétrants, leur flux sur l'atmosphère terrestre est alors plus fort: c'est le phénomène observé. Les rayons cosmiques, en percutant des atomes de  $^{12}\text{C}$  provoquent l'apparition de l'isotope  $^{14}\text{C}$  dont on retrouve les traces fixées dans les corps vivants (cernes des troncs d'arbre par exemple). La concentration en isotope  $^{14}\text{C}$  étant plus grande lors des minima solaires, la représentation graphique de leur opposé, comme sur la figure 6, donne des pics lors des maxima solaires, et des



creux lors des minima. L'isotope  $^{14}\text{C}$  constitue ainsi un indicateur de l'activité solaire globale à long terme, permettant de remonter dans le temps sur quelques milliers d'années. C'est ainsi que l'on suspecte l'existence de grands minima vers 1050 (Oort), 1350 (Wolf), 1500 (Spörer), 1700 (Maunder), 1830 (Dalton), et des optima à l'époque médiévale (1200) et contemporaine. Le grand minimum de Maunder a fait l'objet de nombreuses conjectures (Eddy, 1976).

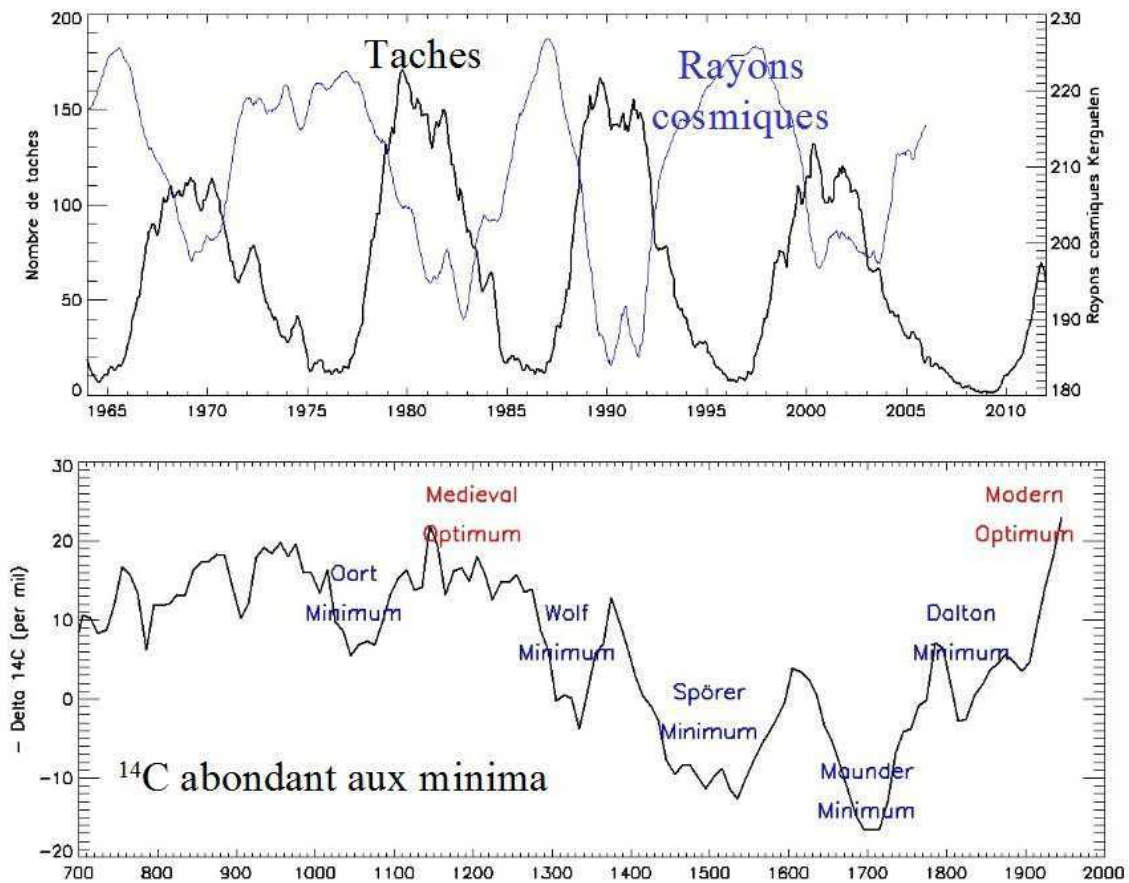


Figure 6: activité solaire, rayons cosmiques et isotope  $^{14}\text{C}$  (opposé des fluctuations)

L'irradiance solaire est un paramètre fondamental qui conditionne l'énergie reçue par la Terre, donc pouvant avoir une influence sur le climat. L'irradiance, ou puissance reçue par unité de surface ( $\text{W m}^{-2}$ ) est une quantité très difficile à déterminer au sol en raison de l'atmosphère terrestre, qui absorbe une partie du rayonnement. Historiquement, la première mesure a été effectuée avec le pyréliomètre de Pouillet. L'irradiance solaire totale intégrée sur le spectre électromagnétique a longtemps été considérée comme constante, d'où son nom de "constante solaire" voisine de  $1366 \text{ W m}^{-2}$  hors atmosphère. Les mesures effectuées par satellite, avec une grande précision, ont montré qu'il n'en était rien. La figure 7 (haut) donne la variation d'irradiance totale sur les cycles 21, 22 et 23. On y détecte une bonne corrélation avec le cycle des taches (nombre de taches de Bruxelles). Ce qui peut sembler paradoxal, l'apparition des taches (sombres) devant intuitivement s'accompagner d'une diminution de luminosité; elle est en fait plus que compensée par l'apparition des facules brillantes autour des taches dont la surface est nettement supérieure.

La variation de la "constante solaire" autour de sa moyenne de  $1366 \text{ W m}^{-2}$  est de  $1 \text{ W m}^{-2}$  seulement au cours du cycle, soit moins de 1/1000 en valeur relative. Une légère anomalie a été détectée pour le cycle 23: si les cycles 21 et 22 sont au même niveau moyen de  $1366 \text{ W m}^{-2}$ , le cycle 23 a vu une baisse d'irradiance de  $0.2 \text{ W m}^{-2}$  (soit 2/10000 en valeur relative). Il en est de même au minimum solaire: le minimum de 2009 est mesuré à  $0.2 \text{ W m}^{-2}$  plus bas que le minimum de 1996. La figure 7 montre que le cycle 23 a été pauvre en taches et qu'il a été long (13 ans), avec une anomalie marquée sur son temps de descente (près de 9 ans).

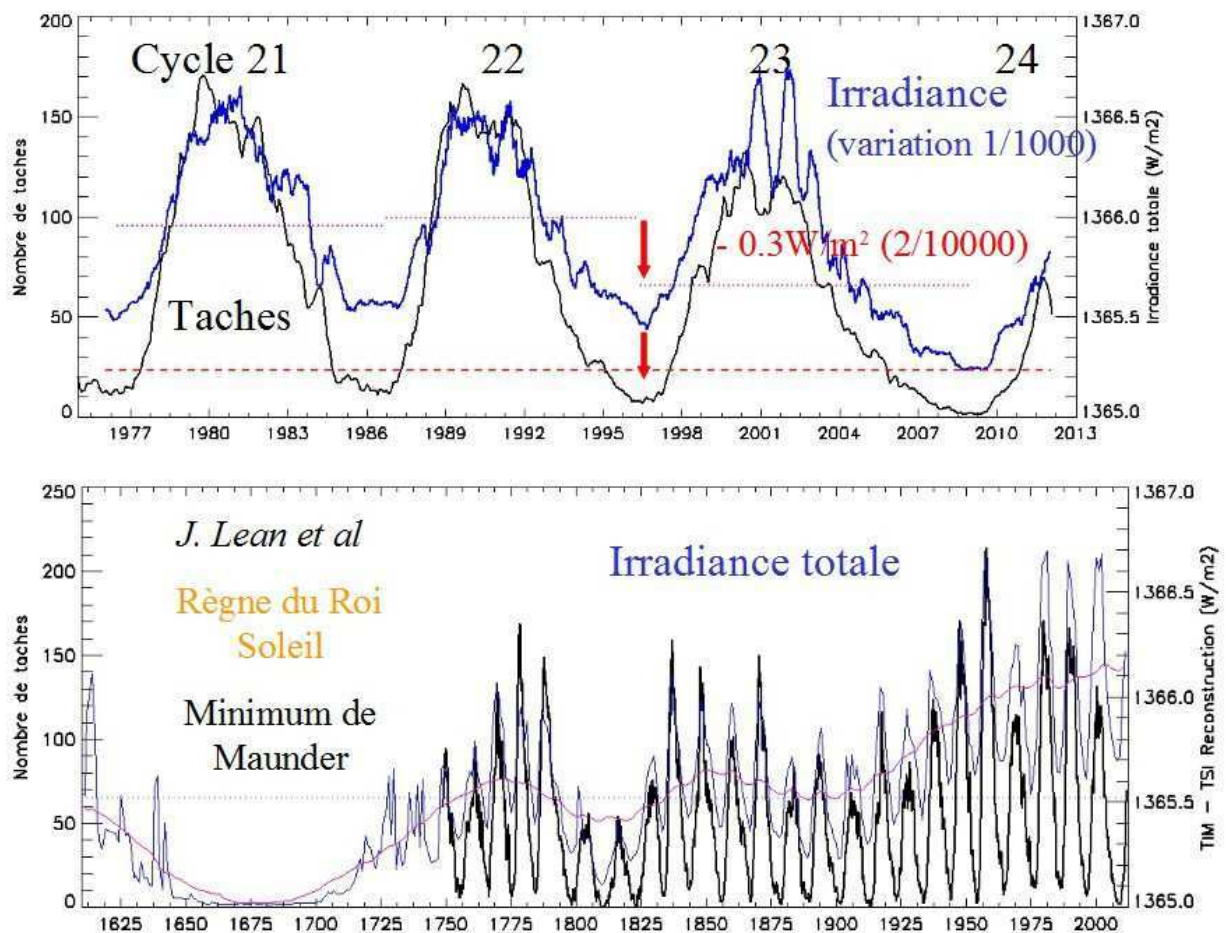


Figure 7: irradiance solaire et cycle solaire

La corrélation étroite entre le cycle (nombre de taches) et l'irradiance a permis à J. Lean (1995) et son équipe de mener à bien un programme de reconstruction de l'irradiance solaire, intéressant les études climatiques, au cours des quatre derniers siècles (courbe bleue, figure 7 bas). L'irradiance solaire lissée (courbe rouge) suit ainsi dans les grandes lignes les séries de cycles forts et faibles, avec des déficits d'irradiance lors des minima de 1900, 1800 et surtout lors du grand minimum de Maunder (1650-1700), connu par les observations optiques des astronomes du XVII<sup>ème</sup> siècle ainsi que par le comptage des aurores boréales. Cette période particulière appartient d'ailleurs à une période de refroidissement plus longue dite du "petit âge glaciaire". A partir de la reconstruction de l'irradiance, les modèles climatiques permettent d'estimer les fluctuations de température, qui divergent à l'époque contemporaine.

Le comptage des éruptions solaires, qui résultent d'instabilités magnétiques, est un indicateur précieux de l'activité solaire. La figure 8 (haut) montre l'évolution de cet indicateur sur les cycles 20, 21, 22 et 23, en superposition du nombre des taches (en noir). On s'attend à une bonne corrélation en raison de la nature magnétique de ces événements, marqués par une accumulation d'énergie magnétique ( $\text{volume} \times B^2 / 2\mu_0$ ) suivie par une libération brutale dont la manifestation est l'activité éruptive.

Les satellites GOES mesurent dans différents canaux le flux solaire intégré sur le disque en rayons X depuis l'orbite terrestre (les rayons X étant absorbés par l'atmosphère). Ce flux X est essentiellement dû aux éruptions qui sont classées en différentes catégories (B, C, M, X), les éruptions de classe X étant les plus énergétiques, mais également les moins nombreuses. Le graphique de la figure 8 (bas) montre le flux des classes C, M et X ainsi que le nombre de taches pendant le cycle 23. La corrélation est frappante, avec une tendance à de grandes éruptions plutôt au début de la phase descendante du cycle.



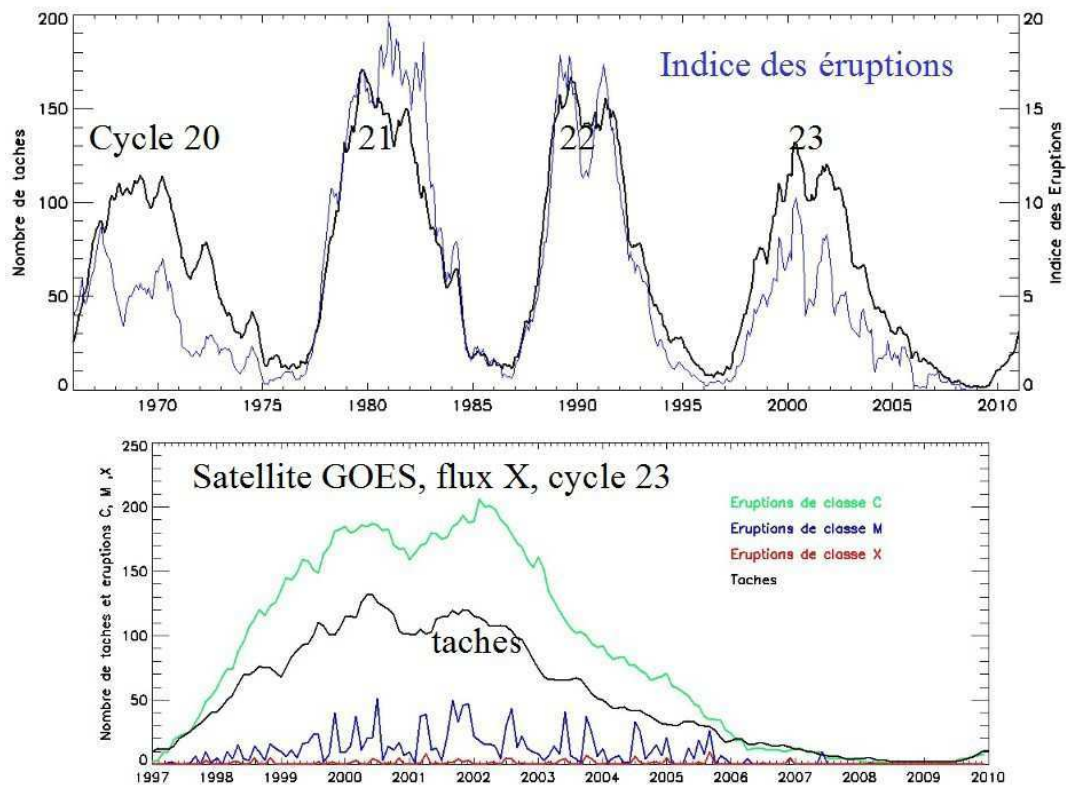


Figure 8: indice des éruptions solaires et flux en rayons X (GOES)

Enfin, la figure 9 explicite l'indice Ultra Violet au cours du cycle des taches, avec une excellente corrélation et une variation de 3 comme pour le flux centimétrique. Un détail correspondant au cycle 23 montre la variation en rayons X intégrée sur le disque: le flux X au maximum solaire est 100 fois supérieur à celui du minimum, le soleil étant alors "noir" en rayons X.

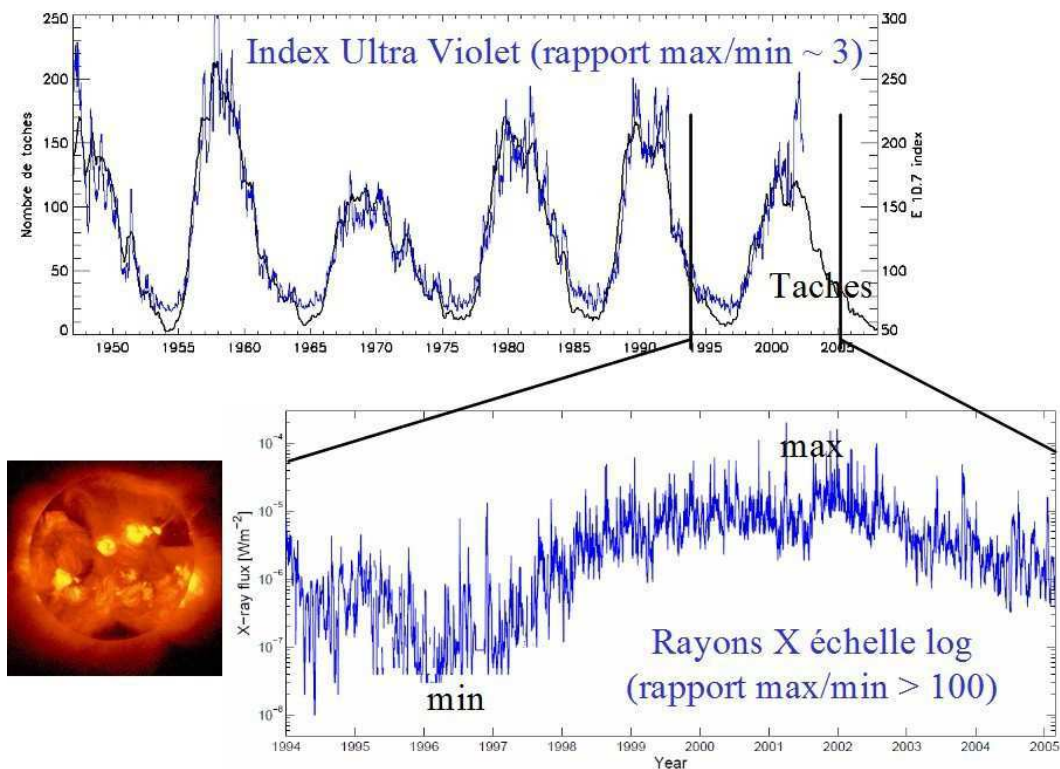


Figure 9: indice UV solaire et flux global en rayons X

### III – Inversions magnétiques

La nature magnétique des taches solaires a été découverte en 1908 par G. Hale (USA) en y détectant la signature de l'effet Zeeman, caractérisé par le doublement ou le triplement des composantes d'une même raie spectrale en présence de champ magnétique et selon son orientation (2 composantes polarisées circulairement en champ longitudinal, 3 composantes polarisées linéairement en champ transversal, figure 10). En champ longitudinal, l'écartement des deux composantes étant proportionnel au champ magnétique, on peut construire aisément des magnétogrammes du soleil entier (champ magnétique en projection sur la ligne de visée).

Les régions actives sont souvent bipolaires, les polarités des taches de tête et de queue étant inversées entre les hémisphères Nord et Sud. G. Hale a remarqué en 1922 qu'il fallait attendre 22 ans pour avoir un retour des polarités à l'identique: c'est le cycle magnétique de 22 ans.

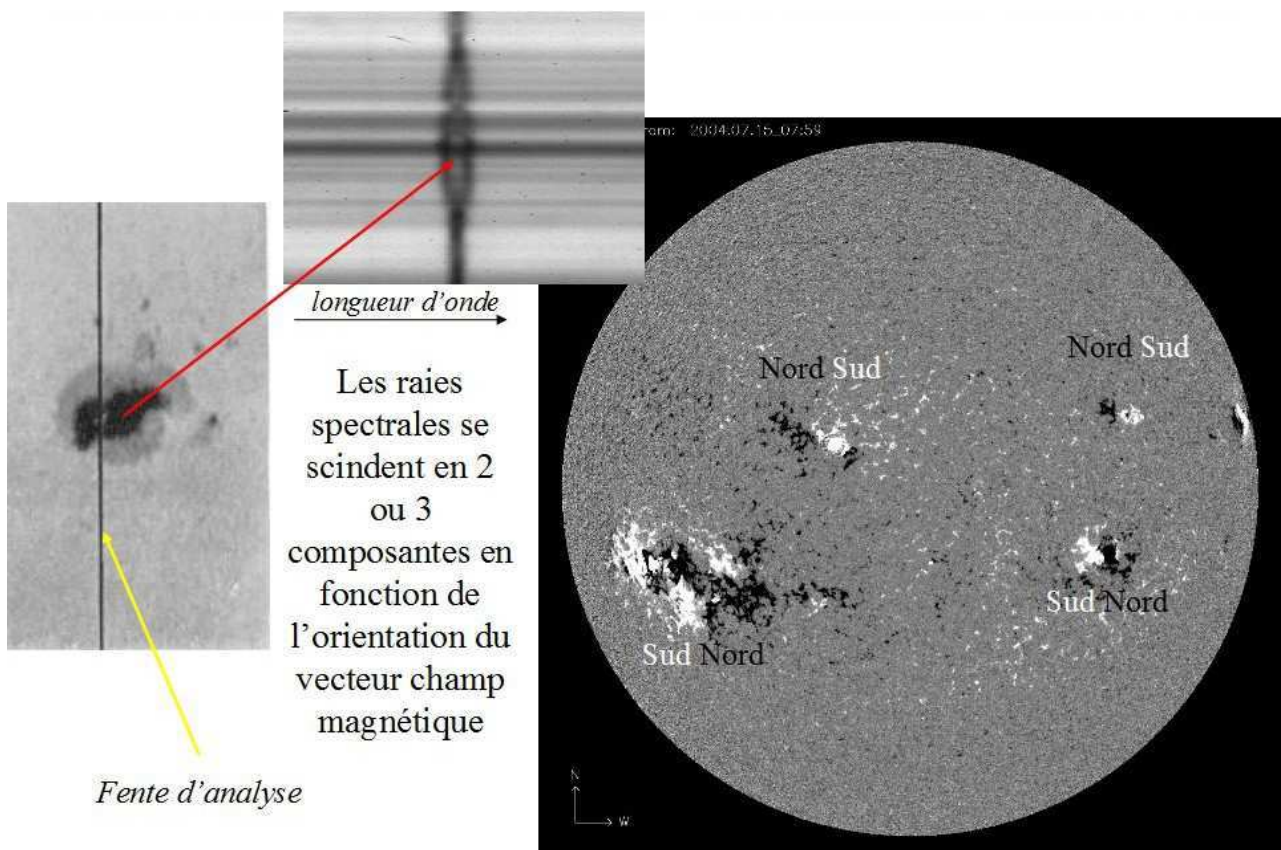
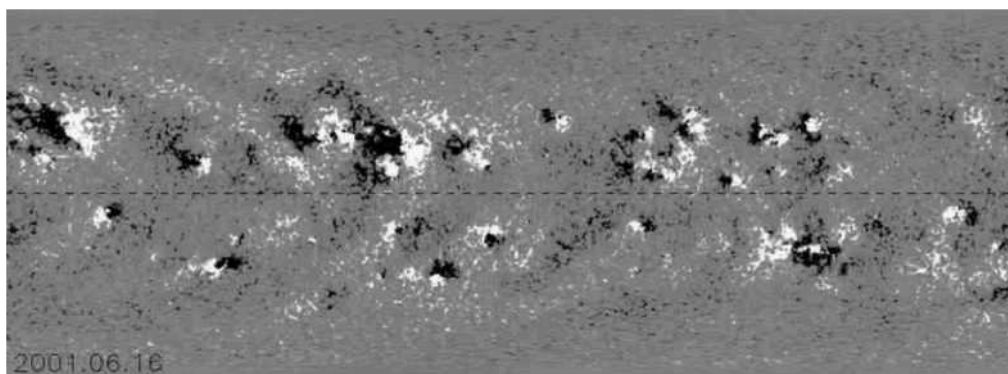


Figure 10: effet Zeeman sur les raies spectrales et mesure du champ magnétique

Les observations régulières des champs magnétiques, de façon systématique, sont récentes, nous n'avons que 35 ans de recul, soit seulement un cycle magnétique et demi, ou trois cycles solaires. Quelques observatoires au sol en ont fait une spécialité reconnue, comme au Mont Wilson, à Wilcox ou à Kitt Peak aux USA. Le premier instrument spatial à observer systématiquement les champs magnétiques fut SOHO/MDI à partir de 1996. Plus récemment, le satellite SDO (2010) a pris sa relève. Enfin, le réseau GONG héliosismologique produit depuis quelques années des magnétogrammes dans ses 6 stations réparties en longitude autour du globe (la station européenne est aux Canaries).

A partir des observations journalières du disque solaire, on calcule des cartes synoptiques des champs magnétiques rotation par rotation (une rotation solaire dure 26 jours), comme le montre la figure 11. On exploite la rotation solaire en saisissant les régions actives autour de leur passage au méridien central. En abscisse, on a donc la longitude, et en ordonnée la latitude, ou bien le sinus de la latitude. Les régions polaires sont les plus mal déterminées, car le champ  $y$  est faible et la composante longitudinale est liée au champ tangentiel et non au champ normal à la surface.





Cartes synoptiques SOHO/MDI au maximum (2001) et au minimum solaire (2008)

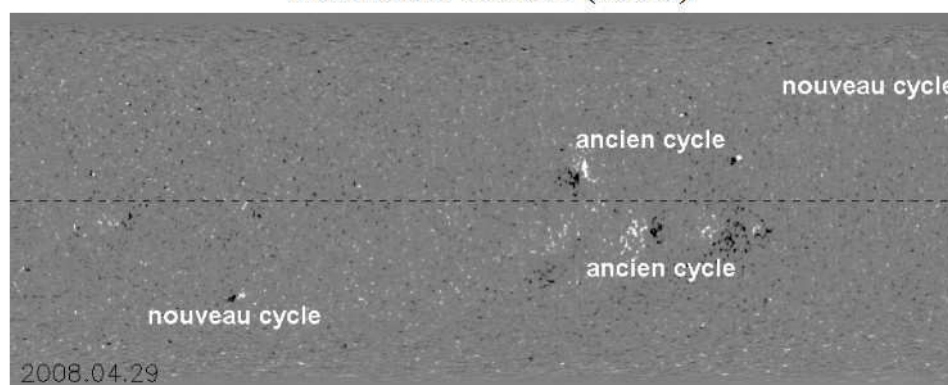


Figure 11:  
cartes synoptiques  
des champs  
magnétiques  
produites par  
SOHO/MDI au  
maximum de 2001  
et au minimum de  
2008.

On remarque au  
minimum la  
coexistence des  
taches de l'ancien  
cycle vers  
l'équateur et du  
nouveau cycle à  
40° de latitude.

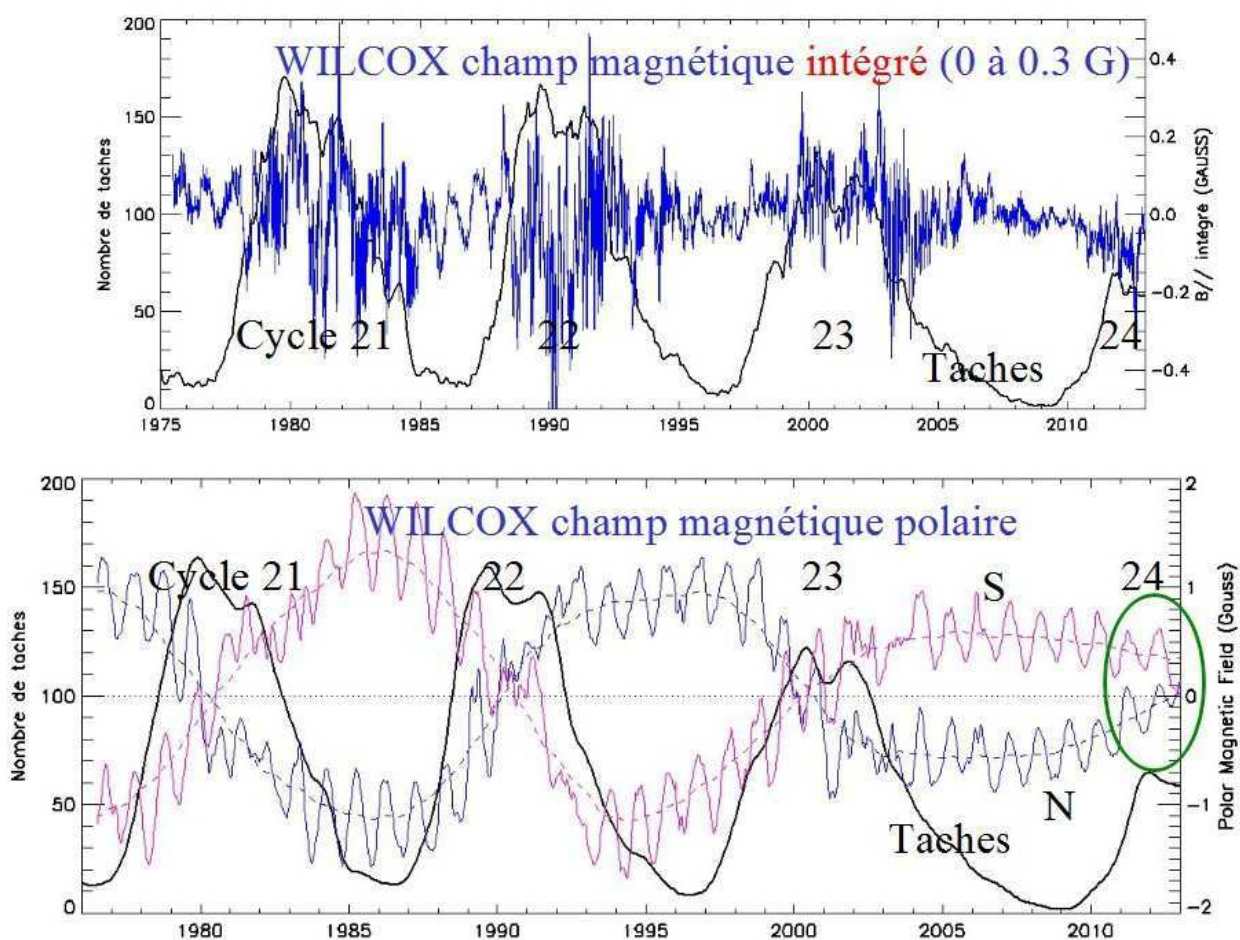


Figure 12: champ magnétique intégré sur le disque et polaire (observations de WILCOX)



L'Observatoire WILCOX effectue des mesures systématiques des champs magnétiques sur le disque depuis 35 ans. La figure 12 (haut) montre le champ intégré sur le disque en même temps que le cycle des taches (calculé par Bruxelles). En valeur absolue, on trouve des fluctuations comprises entre 0 et 0.3 G, les fluctuations étant voisines de zéro aux minima et les plus fortes aux maxima en raison de la présence des régions actives dont le champ magnétique est fort.

Wilcox effectue aussi les mesures polaires présentées sur la figure 12 (bas) avec le nombre de Wolf. Le champ du pôle Nord est en bleu, celui du pôle Sud est en rouge (courbes lissées en tiretés). L'inversion des champs polaires se produit au maximum d'activité solaire, plus ou moins simultanément pour les deux pôles (par exemple, le pôle N est en avance sur le pôle S pour le cycle 24). Les valeurs du champ sont faibles (de l'ordre du Gauss). On remarque une modulation annuelle des champs polaires liée à la variation de visibilité des pôles pendant la révolution de la Terre autour du Soleil (celui ci étant incliné de  $7^\circ$  sur le plan de l'écliptique, figure 13).

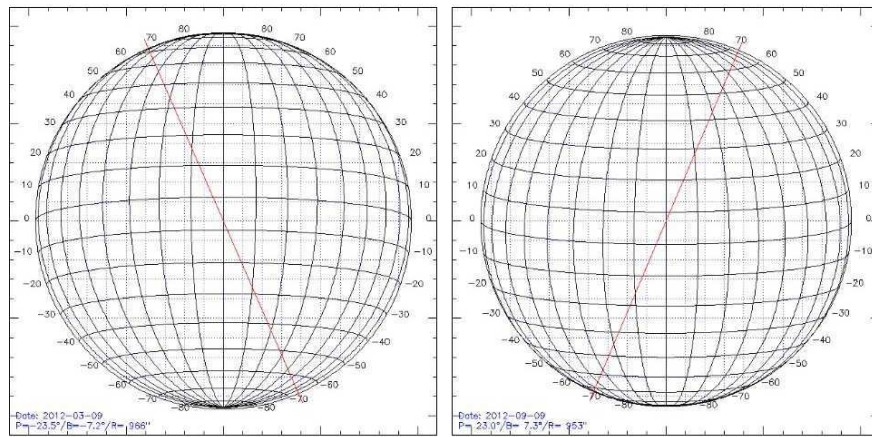


Figure 13: variation de la visibilité des pôles à 6 mois d'intervalle

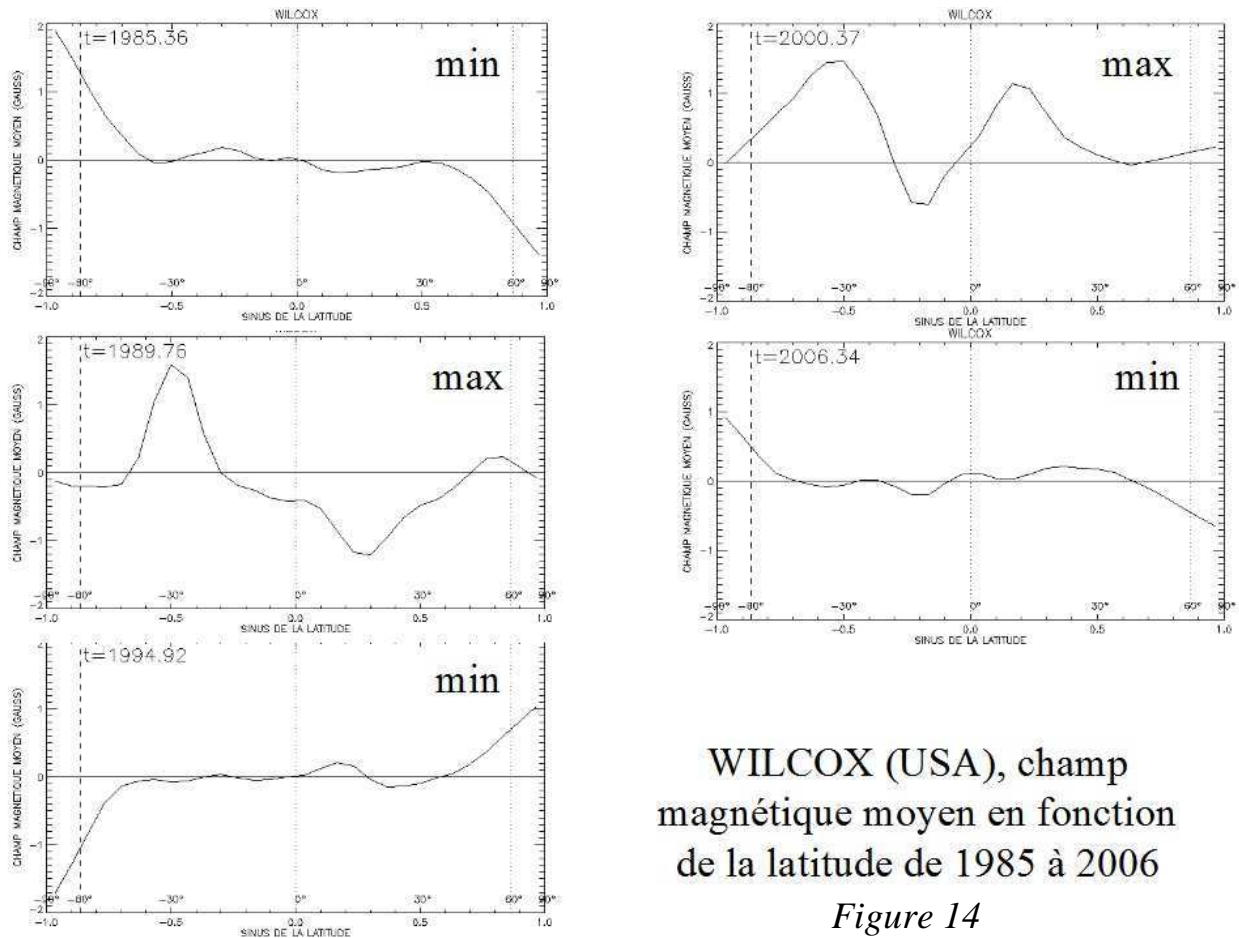


Figure 14

Sur la figure 14, on a représenté en fonction du sinus de la latitude (en abscisse) le champ magnétique moyen (en ordonnée et en Gauss) mesuré par Wilcox à partir d'une intégration en longitude des cartes synoptiques. Le pôle Sud est à gauche, le pôle Nord à droite. L'amplitude de variation des champs intégrés est de 2 Gauss. Le champ polaire est maximal aux minima d'activité solaire (1985, 1995, 2006) et nul aux maxima d'activité, au moment de l'inversion (1990, 2000); tandis que la situation est contraire pour les zones royales où apparaissent les taches (champs forts aux maxima d'activité, faibles aux minima).

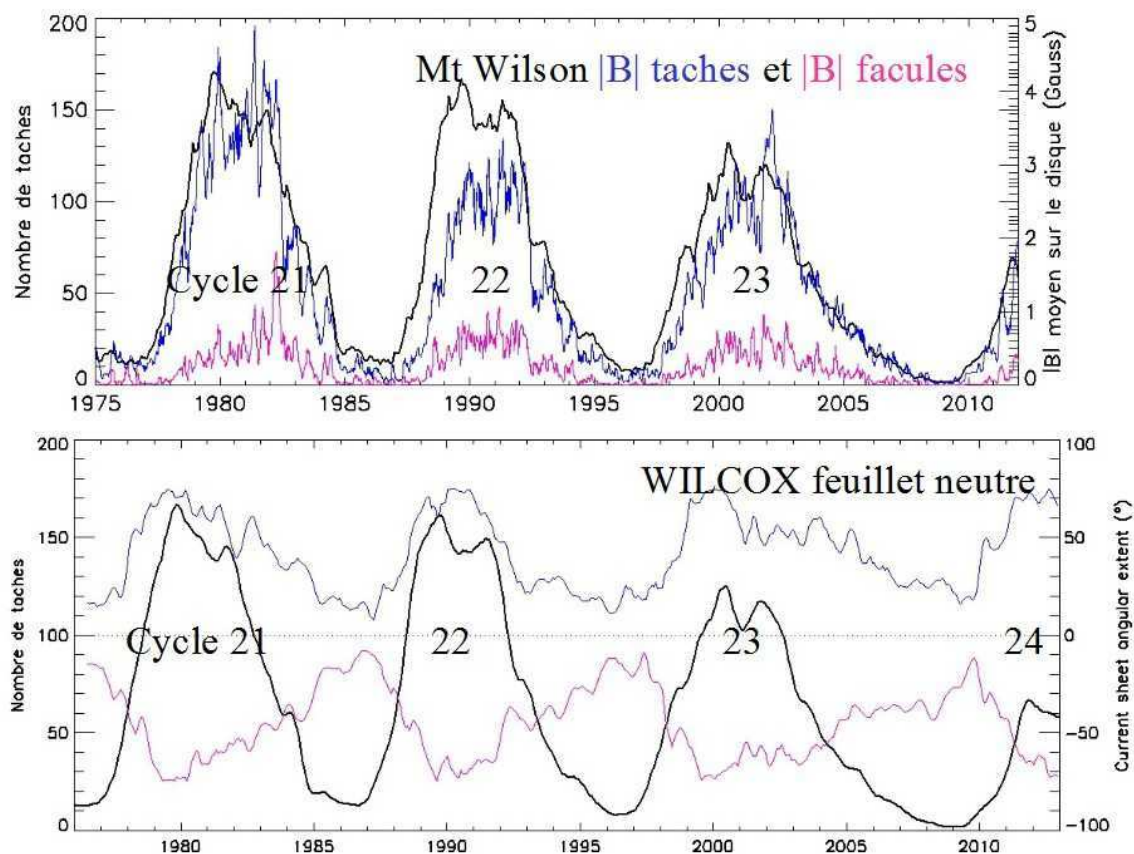
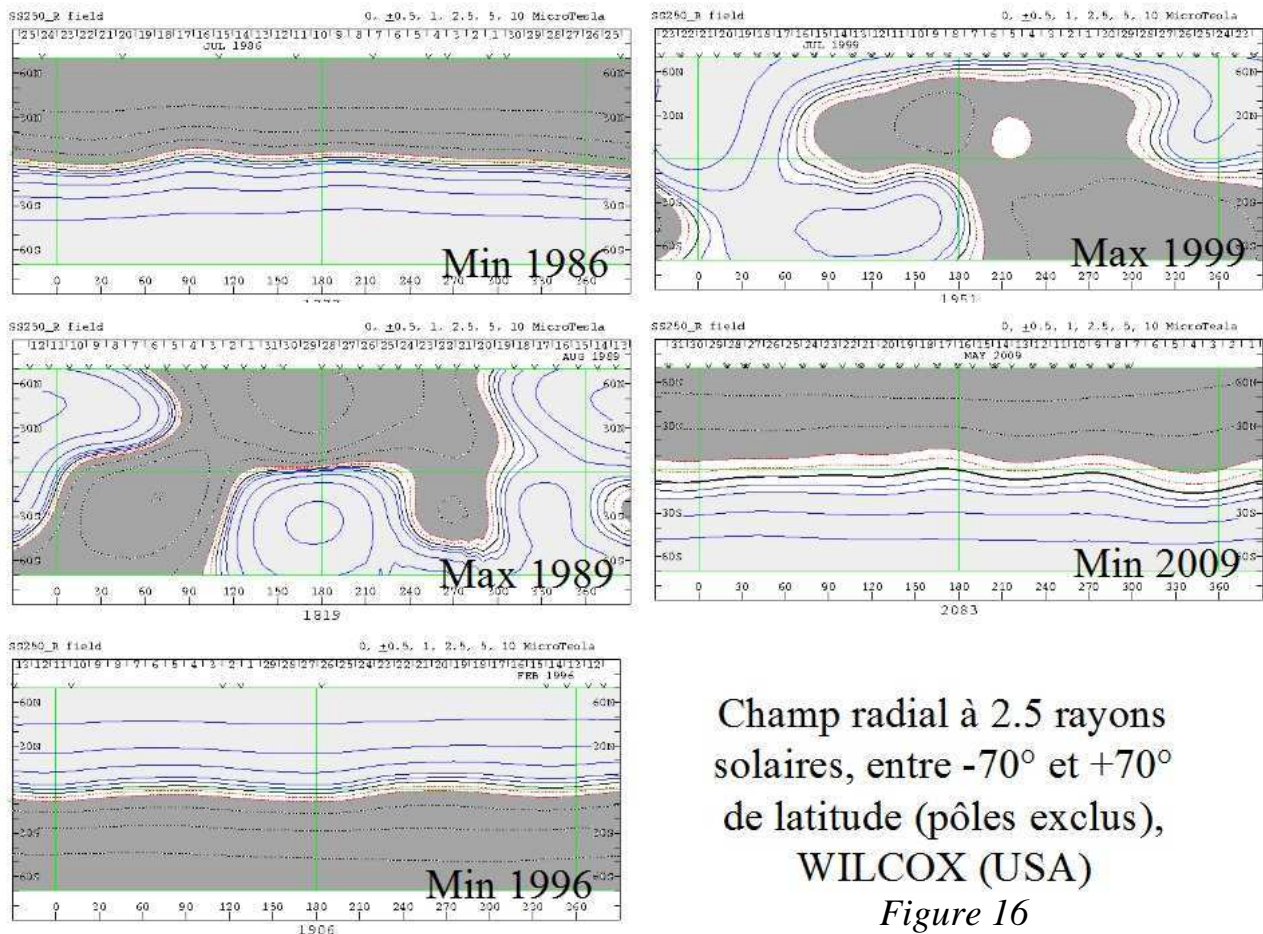


Figure 15: champs magnétiques des taches et des facules, extension du feuillet neutre

La figure 15 (haut) donne la variation, en valeur absolue, des champs magnétiques correspondant aux taches ( $|B| > 100$  G), en bleu, et des champs magnétiques faculaires ( $10 \text{ G} < |B| < 100 \text{ G}$ ), en rouge, valeurs dérivées des données du Mont Wilson, avec en superposition le cycle des taches de Bruxelles (nombre de Wolf). On note l'excellente corrélation entre ces diverses quantités, les champs magnétiques étant ceux des régions actives en grand nombre au maximum solaire.

Wilcox calcule par extrapolation à 2.5 rayons solaires l'extension des champs magnétiques dans le milieu interplanétaire (champs radiaux). Les courbes bleues et rouges (figure 15 bas) donnent les latitudes maximales atteintes par le feuillet neutre (zone d'inversion entre polarités à 2.5 Rs, latitude positive au Nord et négative au Sud), l'extension maximale ( $70^\circ$  en valeur absolue) étant généralement atteinte aux maxima d'activité en raison de la présence des régions actives rompant la symétrie entre les deux hémisphères.

Il existe ainsi des grands secteurs de polarité Nord ou Sud balayant le milieu interplanétaire avec la rotation du soleil sur lui même. Ces secteurs sont représentés, toujours à 2.5 Rs, sur la figure 16 issue des observations de Wilcox (polarités Nord et Sud en gris et blanc, zones polaires exclues, en abscisse la longitude et en ordonnée la latitude de  $-70^\circ$  à  $+70^\circ$ ). On constate la symétrie presque parfaite entre les deux hémisphères aux minima solaires (1986, 1996, 2009). Par contre, la ligne d'inversion entre les polarités à 2.5 Rs prend un caractère chaotique aux maxima (1989, 1999), en correspondance avec l'inversion des champs magnétiques globaux des deux hémisphères.



Champ radial à 2.5 rayons solaires, entre  $-70^\circ$  et  $+70^\circ$  de latitude (pôles exclus), WILCOX (USA)  
Figure 16

## Chronologie des inversions magnétiques

Les observations magnétiques de GONG (2007-2013, figure 17) indiquent une inversion aux latitudes  $45^\circ - 70^\circ$  début 2012 au Nord et fin 2012 au Sud. Néanmoins, au dessus de  $70^\circ$ , l'inversion est en marche mais n'a pas encore eu lieu.

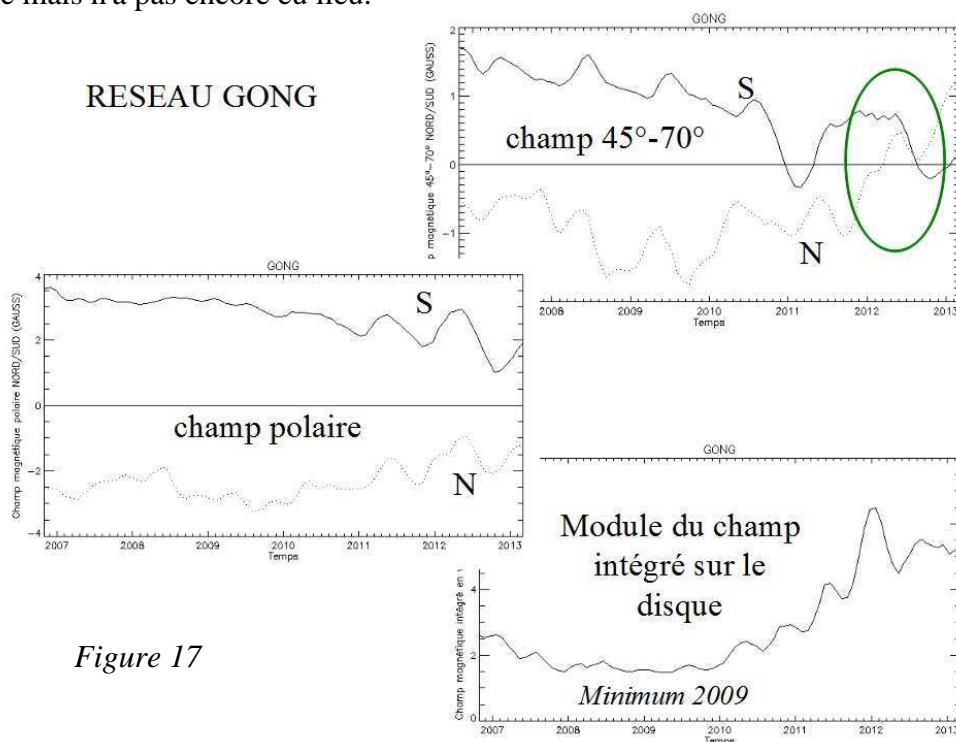


Figure 17



Les observations du Mont Wilson (figure 18) confirment celles du réseau GONG, avec une avance de l'inversion du Nord aux latitudes  $45^\circ - 70^\circ$ , alors que l'inversion polaire au dessus de  $70^\circ$  est en progression, avec une avance du Nord sur le Sud.

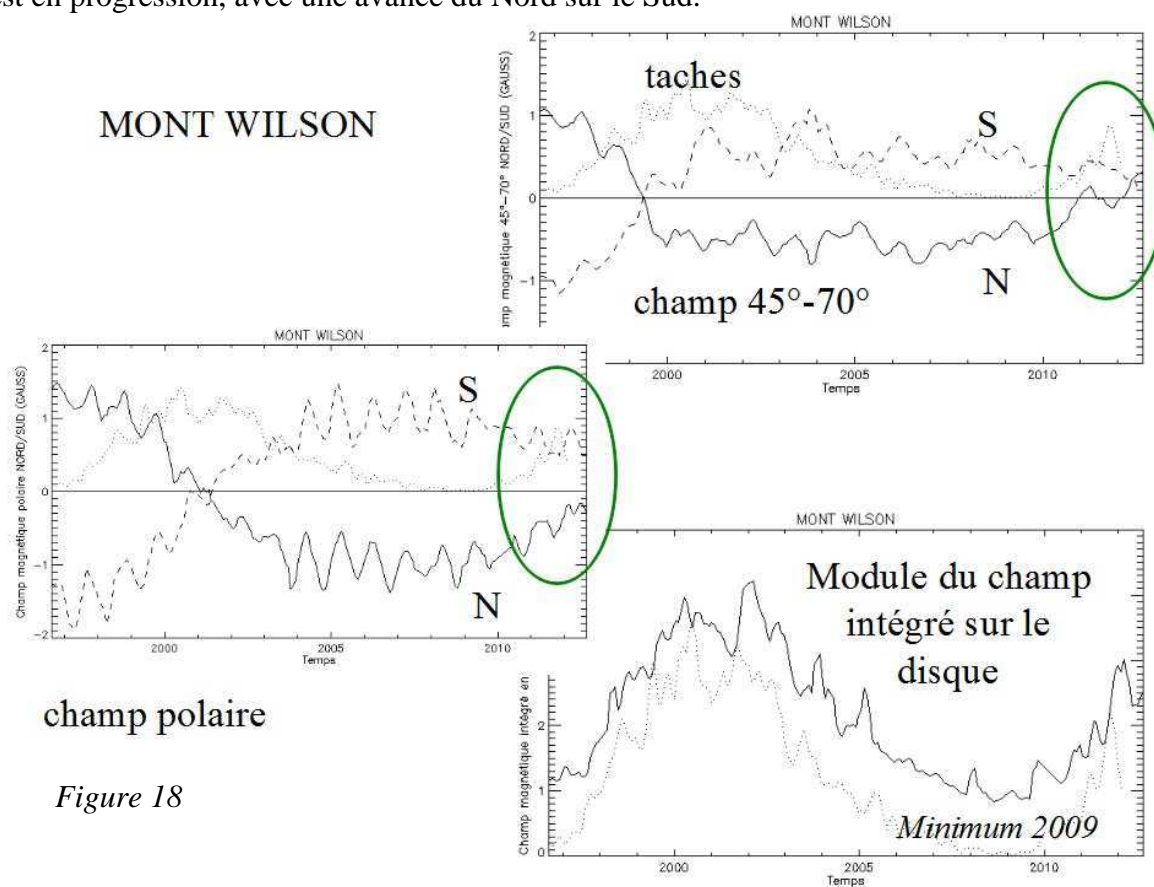
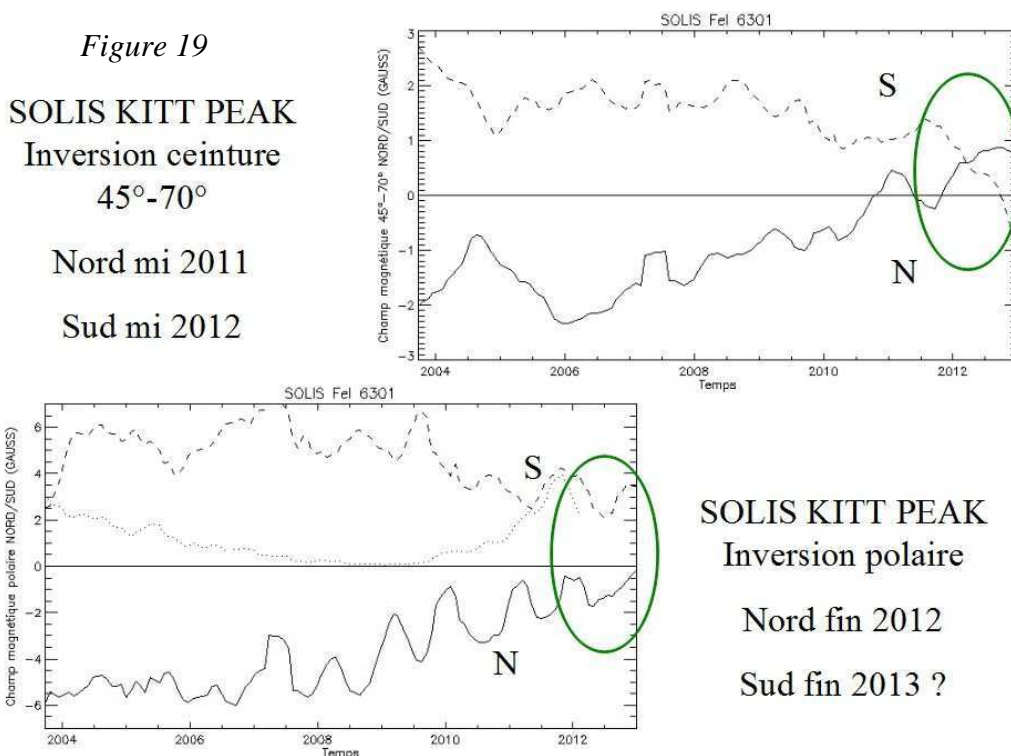


Figure 18

Les observations de SOLIS à Kitt Peak (figure 19) confirment également celles du réseau GONG et du Mont Wilson, avec une inversion achevée aux latitudes  $45^\circ - 70^\circ$  et en cours au niveau des pôles, présentant une avance de 6 mois à un an de l'hémisphère Nord sur le Sud.



Enfin, les observations du satellite HINODE/JAXA en imagerie spectroscopique (figure 20) suggèrent également que l'inversion polaire Nord (au dessus de  $70^\circ$ ) a démarré un an avant l'inversion polaire Sud (polarités rouges/bleues pour négatives/positives).

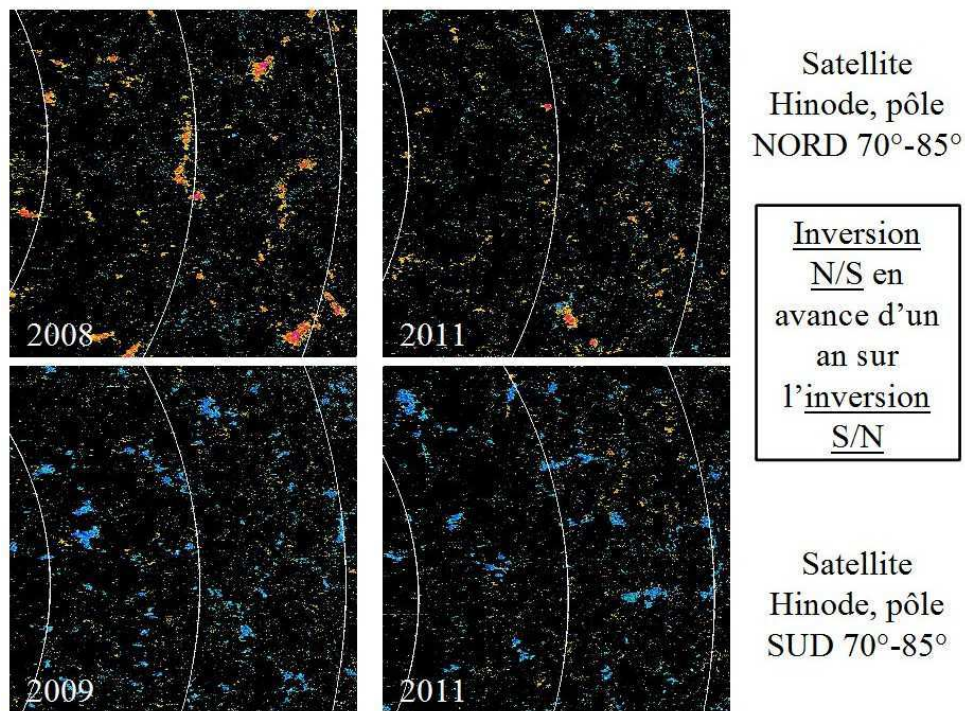


Figure 20

Les cartes synoptiques des champs magnétiques rotation par rotation permettent de calculer, en fonction du temps, les variations des champs magnétiques en fonction du sinus de la latitude à partir des données par intégration le long de la longitude (figure 21).

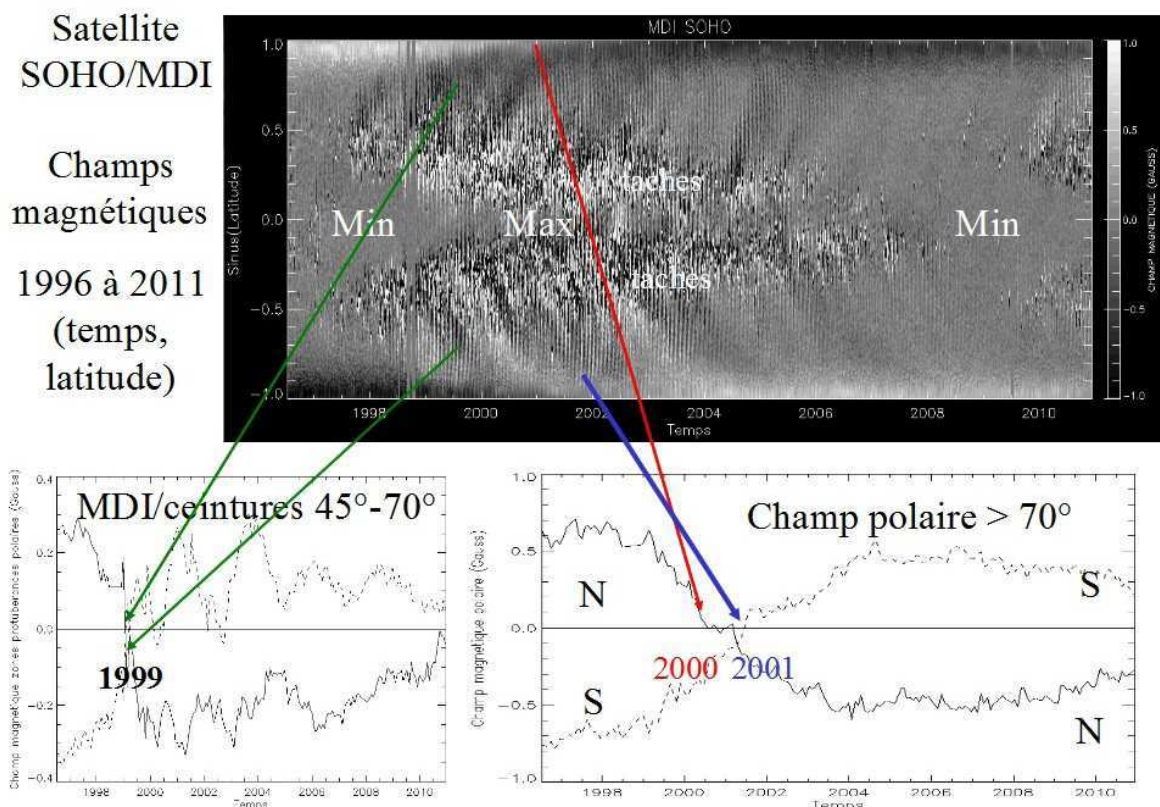


Figure 21: évolution des champs magnétiques durant 15 ans, SOHO/MDI



On constate sur la période observée par SOHO/MDI (figure 21, fin du cycle 22 et cycle 23) une progression de l'inversion des champs vers les pôles (1999 dans la zone  $45^\circ - 70^\circ$ , un à deux ans plus tard pour les pôles). Sur la carte (temps, latitude), les champs positifs (sortants, polarité N) sont représentés en blanc, et négatifs (entrants, polarité S) en noir. Autour du minimum, les taches du nouveau cycle apparaissent aux hautes latitudes ( $40^\circ$ ) et peuvent coexister avec d'anciennes taches du cycle précédent près de l'équateur ( $5^\circ$ ), avec ordre de polarités inversées entre taches de tête et de queue. Lorsque le cycle progresse, les taches se forment à des latitudes de plus en plus faibles formant un diagramme en ailes de papillons.

Les données de Kitt Peak permettent une représentation sur 35 ans (figure 22, temps en abscisse, sinus de la latitude en ordonnée), où apparaît clairement la cyclicité magnétique de 22 ans tant au niveau des pôles que des régions actives (ailes de papillon) avec inversion tous les 11 ans. Nous donnons également un détail entre 1997 et 2012 issu des observations du Mont Wilson.

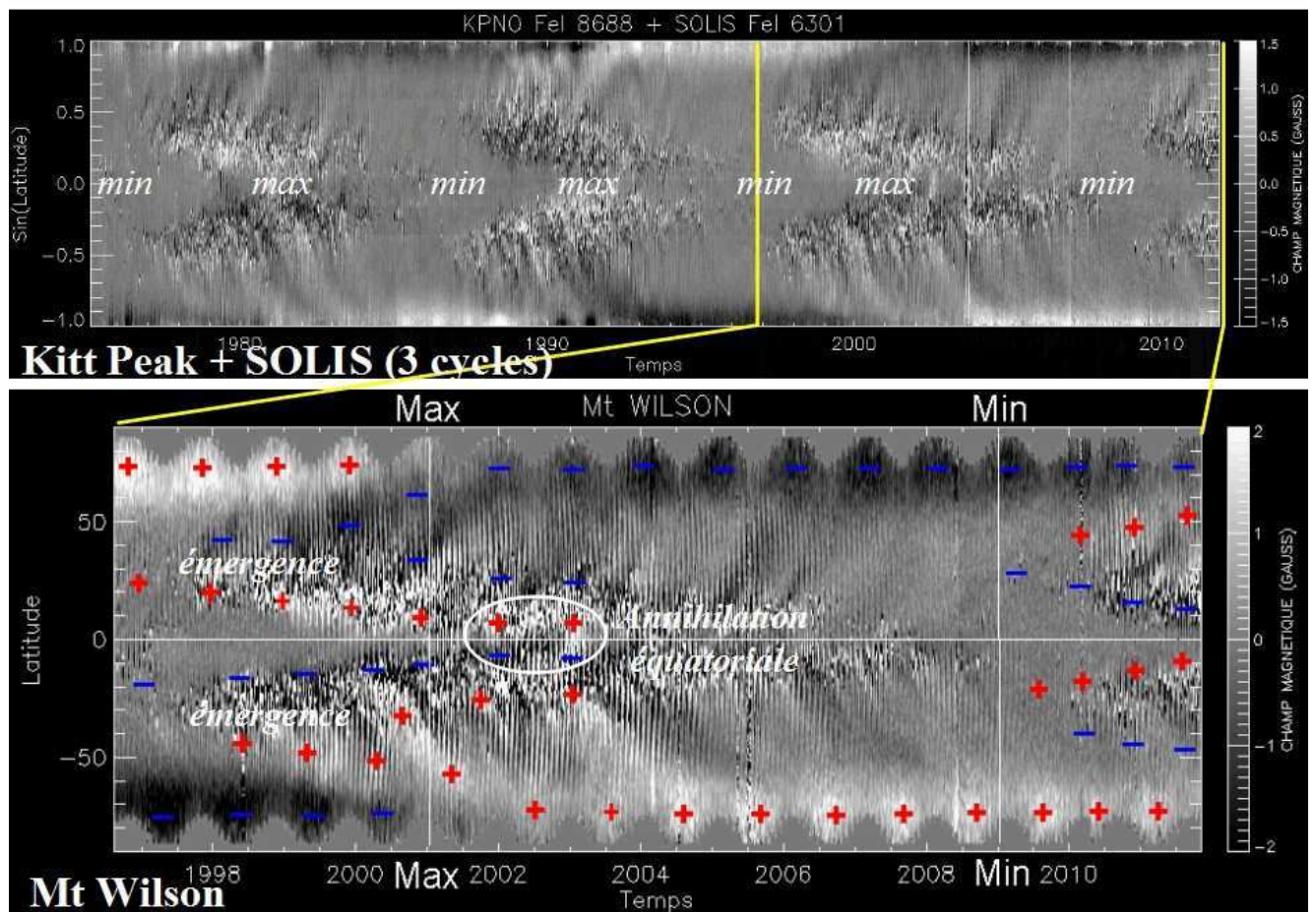


Figure 22: évolution des champs magnétiques durant 35 ans et détail sur 15 ans

Au minimum du cycle (1997), de nouvelles régions actives émergent vers  $40^\circ$  de latitude aux zones royales. Prenons l'exemple de l'hémisphère Nord, de polarité uniforme (+) au minimum de 1997. Les groupes bipolaires qui apparaissent de 1998 à 2001 ont la tache de tête de même polarité magnétique que l'hémisphère Nord (+), et la tache de queue est opposée (-). Les mouvements horaires, liés à la force de Coriolis, vont tendre à orienter les nouvelles polarités dans le sens Nord-Sud, la polarité (-) migrant vers le pôle N, sous l'influence de la circulation méridienne, et la polarité (+) vers l'équateur sous l'influence de la rotation différentielle, plus rapide aux basses latitudes. Il y a donc inversion du champ magnétique dans la zone  $45^\circ - 70^\circ$  avant le pôle. L'annihilation du champ polaire se produit au maximum du cycle vers 2001 puis il se renverse; vers 2002-2004 se produit l'annihilation du champ ayant dérivé vers les basses latitudes de sorte qu'à l'approche du nouveau minimum solaire, l'hémisphère Nord possède une polarité uniforme et



renversée par rapport au cycle précédent (-). La situation est opposée dans l'hémisphère Sud. Ce mécanisme est explicité schématiquement ci dessous (figure 23) et met en jeu deux effets:

- l'effet  $\Omega$  qui part d'un champ dipolaire (minimum du cycle, étape 1) et génère sous l'influence de la rotation différentielle un champ toroïdal (étape 2)
- l'effet  $\alpha$  qui part d'un champ toroïdal pour régénérer un champ poloïdal inversé à la suite de l'émergence de nouvelles régions actives bipolaires (étape 3), la force de Coriolis horaire au Nord et antihoraire au Sud orientant les nouvelles polarités de sorte que leur dérive vers les pôles, pour les unes, ou vers l'équateur, pour les autres (étape 4 à l'approche au maximum solaire) conduise à l'annihilation puis au renversement du champ préexistant

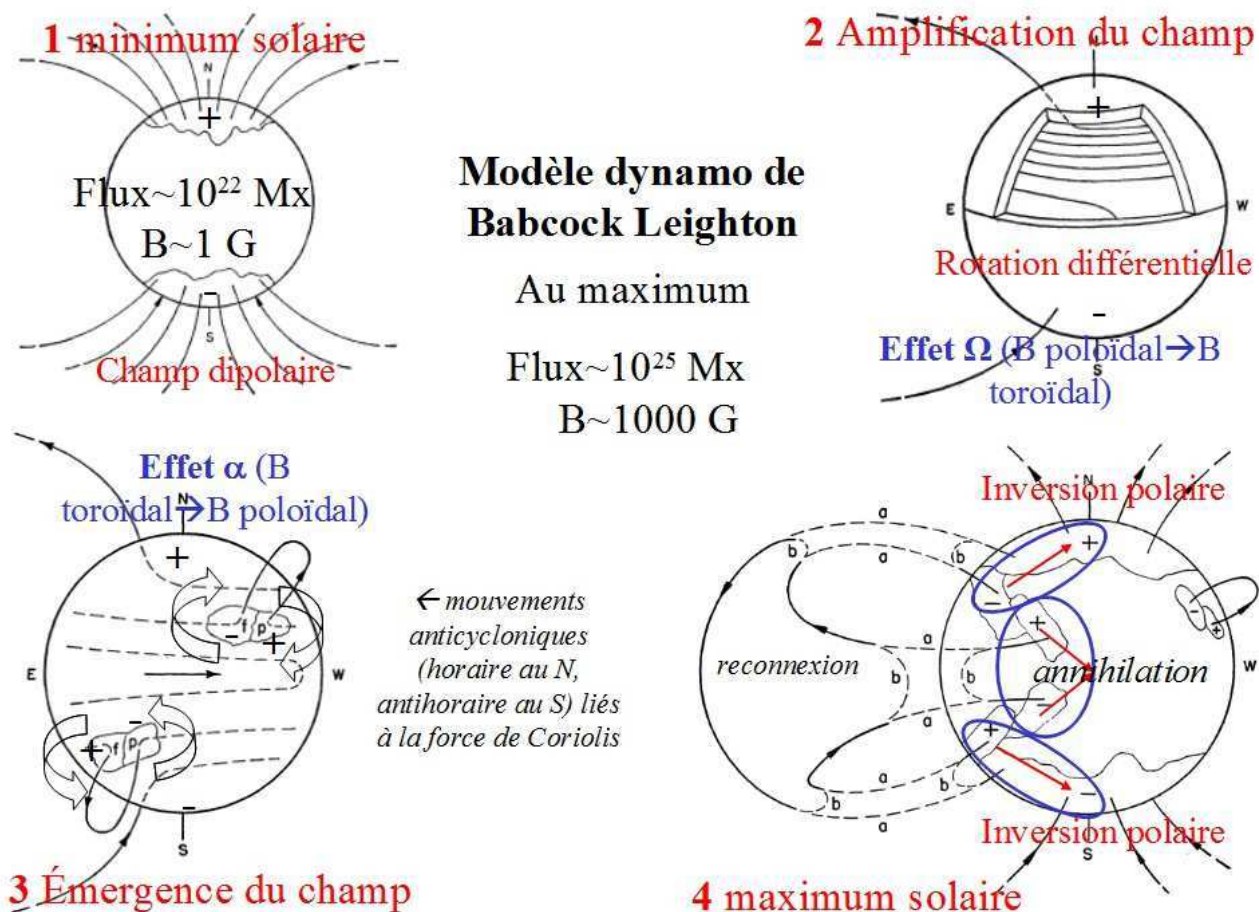


Figure 23: modèle de dynamo solaire de Babcock Leighton

### Un autre type d'inversions magnétiques

Au début d'un nouveau cycle, on a vu que des régions de polarité opposée à l'ancien cycle se forment, se développent et migrent lentement vers les pôles en provoquant le renversement du champ au maximum solaire. Il existe donc à la surface du soleil, aux latitudes élevées (supérieures à  $60^\circ$ ) de longues lignes d'inversion magnétiques, propices à la condensation de matière de type chromosphérique: ce sont les filaments ou les protubérances des ceintures polaires (figure 24). Ceux ci sont supportés contre la gravité par une force de Laplace dirigée vers le haut, un véritable "berceau magnétique" ! Ainsi que le montre la figure, les champs axiaux mesurés dans les protubérances ont un sens qui dépend de la polarité de chaque hémisphère, et donc se renverse tous les 11 ans. Le modèle de configuration magnétique le plus propice a été proposé par Kippenhahn et Schlüter en 1957, avec une polarité opposée dans la protubérance par rapport à ce qu'elle est sur la surface solaire dans la photosphère sous jacente. Ce modèle n'est pas valable aux latitudes plus basses au voisinage des centres actifs (filaments dits de plage).

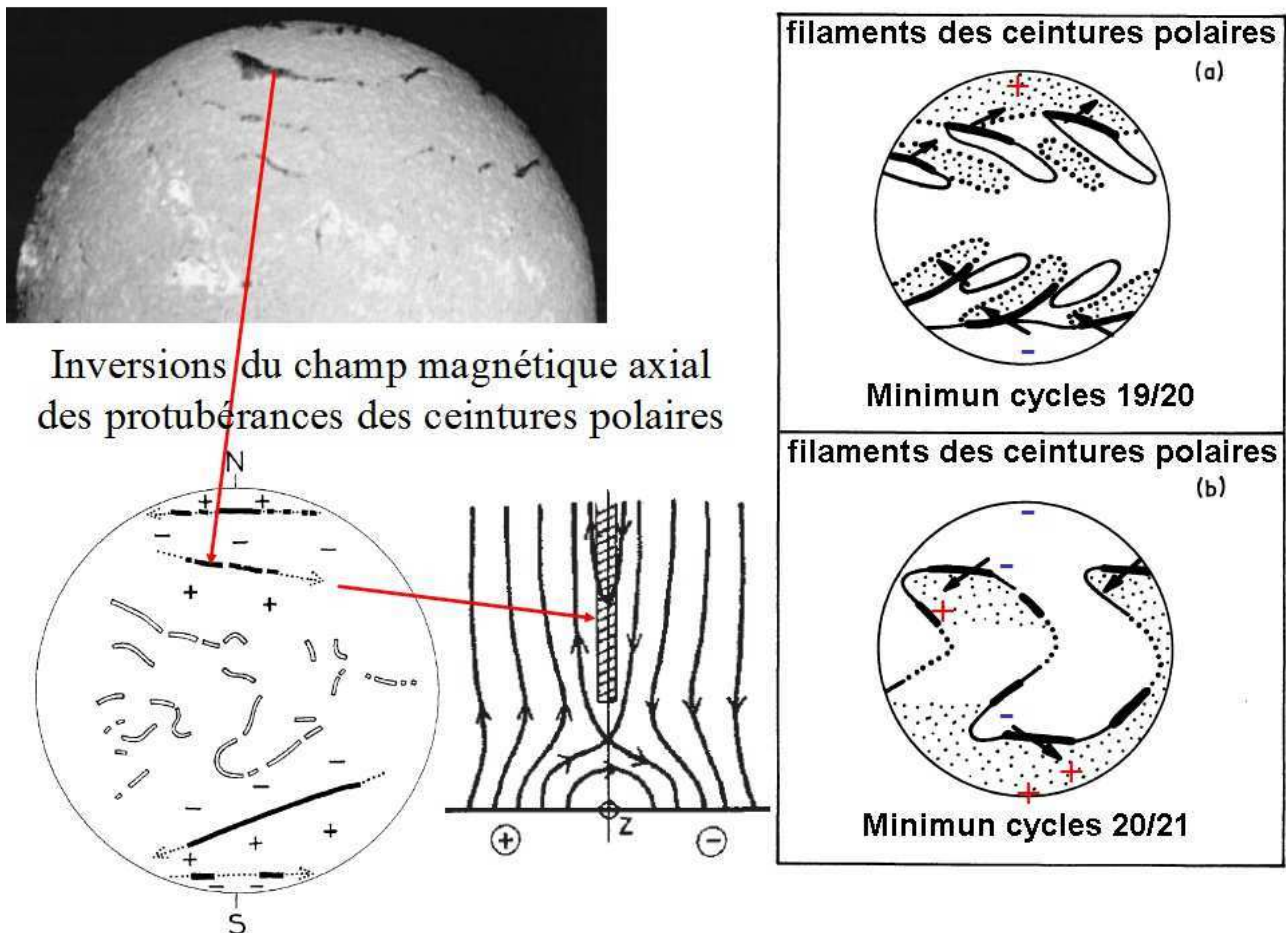


Figure 24: inversion du champ magnétique axial des protubérances des ceintures polaires

#### IV – Des anomalies dans la cyclicité

Les nombreuses observations d'héliosismologie faites notamment par l'instrument SOHO/MDI ont permis d'établir ou de préciser un certain nombre de propriétés concernant la structure interne du soleil (figure 25):

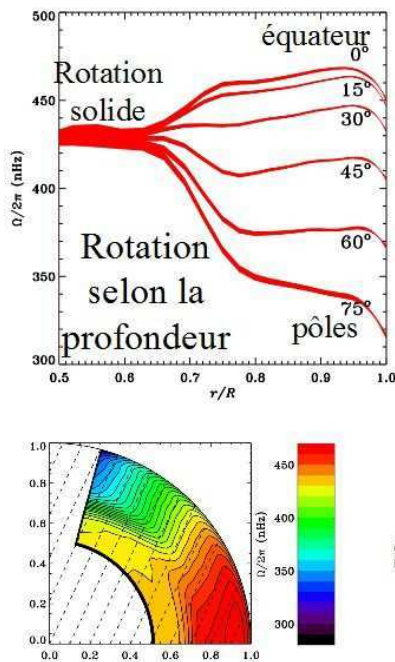
- la rotation en profondeur (0.75 rayon solaire et en dessous) est rigide, contrairement aux couches situées dans la zone convective qui sont animées par une rotation différentielle plus rapide que la rotation rigide aux latitudes inférieures à  $40^\circ$ , et plus lente au dessus de  $40^\circ$  vers les pôles
- la circulation méridienne est un mouvement de transport de l'équateur vers les pôles à la vitesse moyenne de 10 m/s, valeur expliquant en première approximation la durée du cycle solaire. SOHO a montré que la circulation méridienne serait modulée par le cycle solaire, et notamment serait plus faible au maximum d'activité qu'au minimum.

Le cycle 23 a été particulier, avec une durée très longue (12.7 ans), un minimum prolongé, un record du nombre de jours sans taches remontant à cent ans, un champ magnétique polaire plus faible qu'aux cycles 21 et 22 (données Wilcox page 10), un flux radio également très bas, une irradiance en baisse de 2/10000 en valeur relative. Comment expliquer de telles fluctuations ?

Haber et al (2002) ont mis en évidence via l'héliosismologie une anomalie dans la circulation méridienne pendant la montée du cycle 23 (figure 26) présentant le développement d'une contre cellule profonde de 1999 à 2001 (circulation opposée à la circulation normale), aux latitudes voisines de  $40^\circ$  dans l'hémisphère Nord; anomalie qui pourrait avoir eu une action en ralentissant la progression du cycle.



## Rotation différentielle



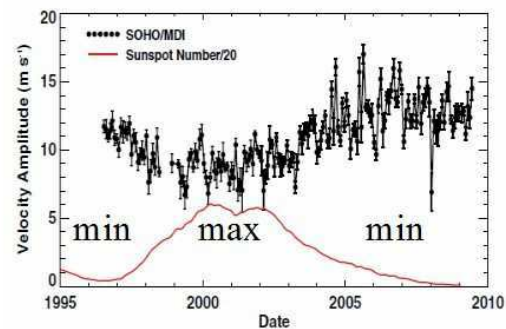
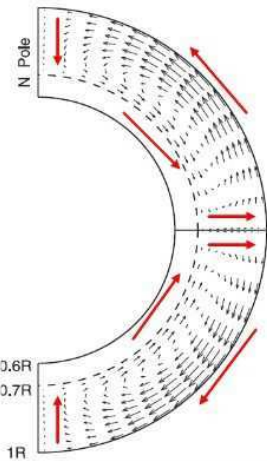
## Circulation méridienne

(dépend de la latitude, de la profondeur et du temps)

$$v \sim 10 \text{ m/s}$$

→ Durée du cycle

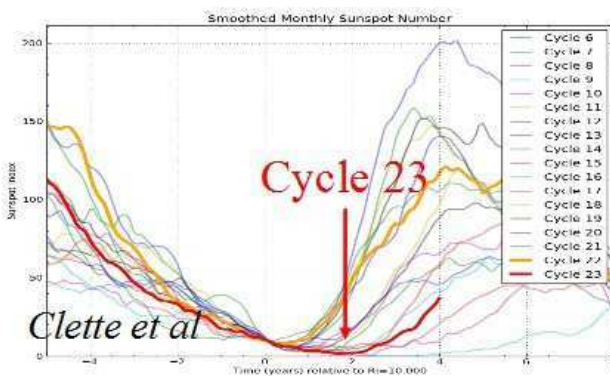
$$T \sim \pi R/v \sim 10 \text{ ans}$$



Résultats  
SOHO/MDI

Figure 25: rotation différentielle et circulation méridienne

Cycle 23: long (12.7 ans), minimum prolongé, champ magnétique polaire faible, nombre de jours sans taches le plus petit depuis 100 ans



cellule profonde au Nord avant le maximum du cycle 23 (résultat SOHO/MDI)

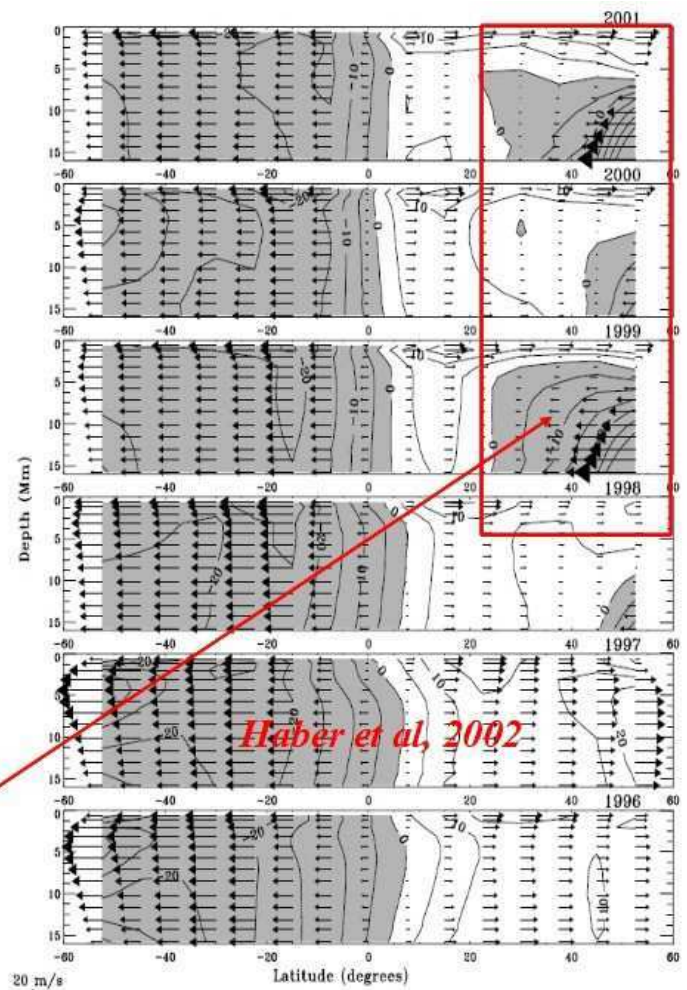


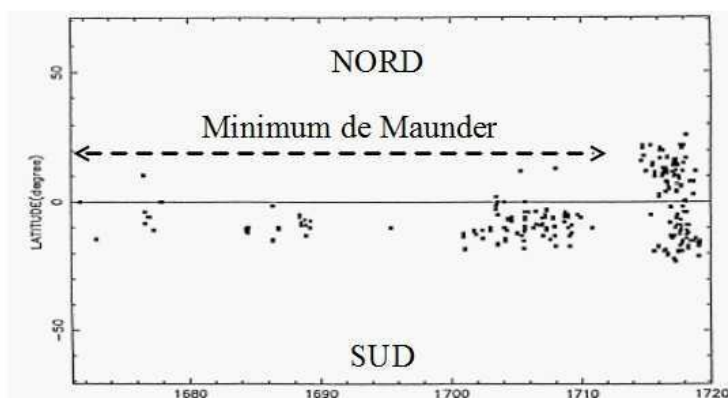
Figure 26: une anomalie de circulation méridienne au début du cycle 23 ?



Le grand minimum de Maunder, à l'époque de Louis XIV, entre 1650 et 1710, longue période de 5 cycles solaires, constitue une anomalie bien plus remarquable dans son ampleur et sa durée (figure 7). A cette époque, les taches solaires étaient déjà très surveillées par les astronomes européens, notamment par Hévelius à Gdansk (Pologne) et à l'Observatoire de Paris (fondé en 1667 par Colbert). Plusieurs études, dont celle de Ribes-Nesme et al (figure 27), ont été publiées sur les mesures conservées dans les fonds historiques. A Paris, les astronomes les plus actifs furent l'abbé Picard et Ph. de la Hire. La compilation des données anciennes suggère plusieurs remarques:

- une asymétrie possible, marquée entre les deux hémiphères, avec peu de taches observées au Nord de l'équateur
- une controverse sur la vitesse de rotation du soleil: certaines interprétations suggèrent que la rotation solaire aurait pu être plus lente ou plus rapide qu'aujourd'hui
- le diamètre du soleil aurait pu être plus grand de quelques seconde d'arc par rapport à la situation actuelle (mesures de Picard et La Hire à Paris)

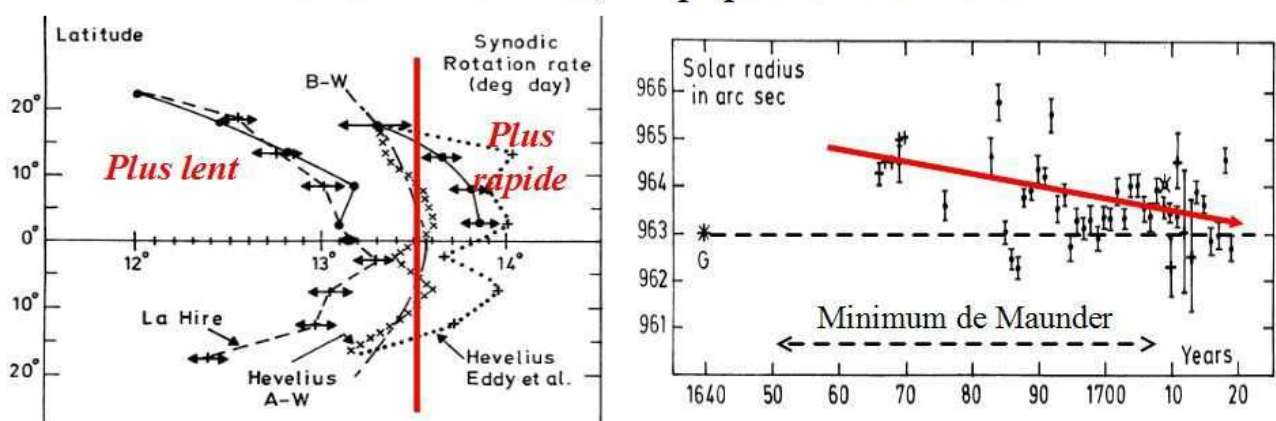
Ces hypothèses sont entachées d'une grande incertitude à cause de la précision des instruments dont les astronomes disposaient à l'époque. Il semble que le minimum de Maunder ait été marqué par un déficit important d'aurores boréales (Krivsky et al), sans que pour autant le cycle solaire se soit éteint. Les chroniques font également état d'une anomalie de température, le "petit âge glaciaire", certes plus étendu temporellement que le minimum de Maunder. Les reconstructions de Lean et al (1995) suggèrent une dépression dans l'irradiance solaire à cette époque.



Minimum de Maunder  
1645-1705

Asymétrie marquée  
Nord Sud des taches ?  
Rotation plus rapide ?  
Soleil plus gros ?

*Minimum de Maunder, à l'époque du « Roi Soleil »*



*Figure 27: Minimum de Maunder d'après les observations de l'époque*

D'autres minima assez profonds (mais moins intenses que le minimum de Maunder) ont été remarqués, et il est encore impossible d'expliquer ces phénomènes dans lesquels des perturbations de circulation méridienne ou de rotation différentielle jouent certainement un grand rôle.

Les mesures du diamètre solaire effectuées par Picard et La Hire nous questionnent sur la variabilité du diamètre solaire. Qu'apportent les mesures modernes ? Ces mesures sont extrêmement

complexes en raison de la précision nécessaire et du rôle mal connu joué par l'atmosphère terrestre qui perturbe les observations. Les astrolabes du plateau de Calern (figure 28 haut) utilisés par F. Laclare (OCA) ainsi que l'expérience en ballon stratosphérique SDS "solar disk sextant" de S. Sofia et al (Université de Yale, USA) nous apportent des éléments provisoires de réponse. Les observations réalisées à l'astrolabe de Calern entre 1978 et 2002 suggèrent une anticorrélation entre les variations du diamètre solaire et le cycle des taches, avec un rayon supérieur de 0.15 secondes de degré au minimum d'activité. Les mesures de SDS pendant la décroissance du cycle 22 entre 1992 et 1996 suggèrent également une augmentation du rayon de 0.2 secondes. Ces mesures restent à confirmer, notamment par un instrument spatial dédié, comme le microsatellite PICARD du CNES.

On a remarqué que l'amplitude du cycle des taches décroît depuis 3 cycles solaires (figure 3); outre les fluctuations cycliques possibles du rayon, on soupçonne également (figure 28 bas) une évolution lente du rayon solaire, dans le sens de la croissance à hauteur de 0.2 seconde en 25 ans, donc en corrélation avec la lente diminution de l'activité solaire. De tels résultats sont à prendre avec précaution en raison de la fiabilité incertaine des mesures au sol.

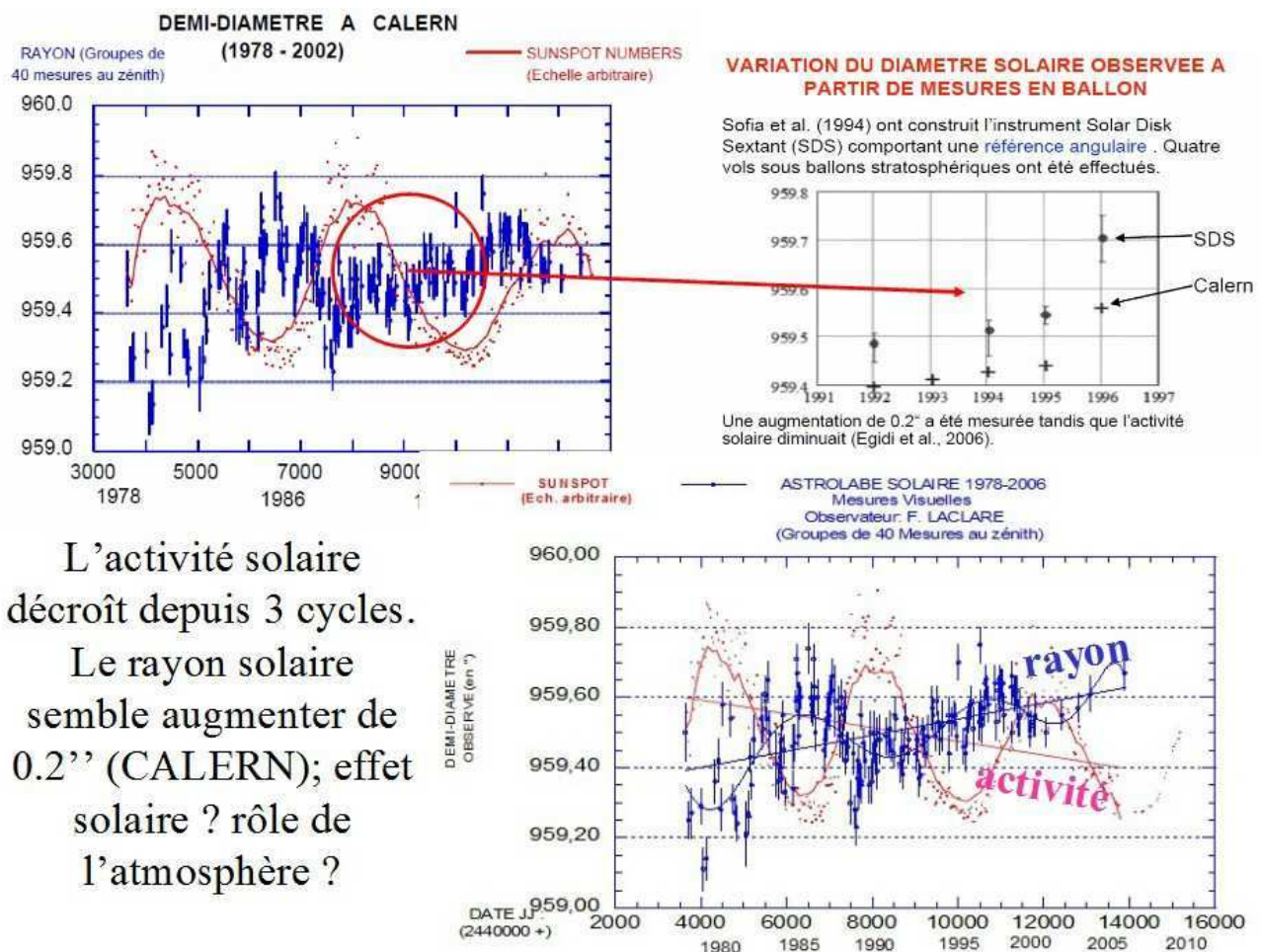


Figure 28: variation du diamètre solaire et cycle solaire

\*\*\*\*\*

Site Web correspondant à cet article:

[http://solaire.obspm.fr/pages/cycle\\_solaire/cycle\\_solaire.html](http://solaire.obspm.fr/pages/cycle_solaire/cycle_solaire.html)

## Références

### Revues

- Charbonneau, P.: Dynamo Models of the Solar Cycle, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 3  
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>
- Fan, Y.: Magnetic Fields in the Solar Convection Zone, Living Rev. Solar Phys., 1, (2004), 1  
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2004-1>
- Gizon, L., Birch, A.: Local heliosismology, Living Rev. Solar Phys., 2, (2005), 6  
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-6>
- Hataway, D.: The solar cycle, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1  
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>
- Lantos, P: Le cycle solaire, monographie "le soleil en face", chapitre 6, Masson, 1997
- Petrovay, C.: Solar Cycle Prediction, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 6  
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-6>

### Articles

- Babcock, H.W., the topology of the sun's magnetic field and the 22 year cycle, 1961, ApJ, 333, 572B
- Benevolenskaya, E.: Polar magnetic flux on the Sun in 1996–2003 from SOHO/MDI data, 2004, A&A, 428, L5
- Clette, F., Lefevre, L.: A global small sunspot deficit at the base of the index anomalies of solar cycle 23, 2011, A&A, 536, L11
- Dikpati, M., de Toma, G., Gilman, P., Arge, C., White, O.:Diagnostics of polar field reversal in solar cycle 23 using a flux transport dynamo model, 2004, ApJ, 601, 1136
- Dikpati, M., Gilman, P.: Simulating and predicting solar cycles using a flux-transport dynamo, 2006, ApJ, 649, 498
- Eddy, J.: The Maunder Minimum, 1976, Science, Vol 192, 4245, 1189
- Egidi, A., Caccin, B., Sofia, S., Heaps, W., Hoegy, W., Twigg, L.: High-precision measurements of the solar diameter and oblateness by the solar disk sextant (SDS) experiment, 2006, Solar Physics, 235, 407
- Haber, D., Hindman, B., Toomre, J., Bogart, R., Larsen, R., Hill, F.: Evolving submerged meridional circulation cells within the upper convection zone revealed by ring-diagram analysis, 2002, ApJ, 570, 855
- Hataway, D., Rightmire, L.: Variations in the sun meridional flow over a solar cycle, 2012, Science, 327, 1350
- Hataway, D.: Does the Current Minimum Validate (or Invalidate) Cycle Prediction Methods ? SOHO-23: Understanding a Peculiar Solar Minimum, 2010, ASP Conference Series, Vol. 428, 307
- Janardhan, P., Susanta, K., Gosain, S.: Solar Polar Fields During Cycles 21 — 23: Correlation with Meridional Flows, [arXiv:1009.4299v1](https://arxiv.org/abs/1009.4299v1) [physics.space-ph]
- Lean, J., Beer, J., Bradley, R.: Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change, 1995, Geophysical Research Letters, Vol 22, 23, 3195
- Leroy, J.L., Bommier, V. Sahal-Bréchet, S.: The magnetic field of the prominences of the polar crown, 1983, Solar Phys., 83, 135
- Nandy, D., Munoz, A., Martens, P.: The unusual minimum of sunspot cycle 23 caused by meridional plasma flow variations, 2011, Nature, 471, 82
- Priest, E.: The Nature and Significance of Solar Minima, 2012, Proceedings IAU Symposium No. 286, C. Mandrini & D. Webb, eds.
- Wang, Y., Robbrecht, E., Sheeley, N.: On the weakening of the polar magnetic fields during solar cycle 23, 2009, ApJ, 707, 1372
- Wang, Y., Lean, J., Sheeley, N.: Modeling the sun's magnetic field and irradiance since 1713, 2005, ApJ, 625, 522

\*\*\*\*\*